

Design Guide: TIDA-010244

基于三相分流的电能计量参考设计



说明

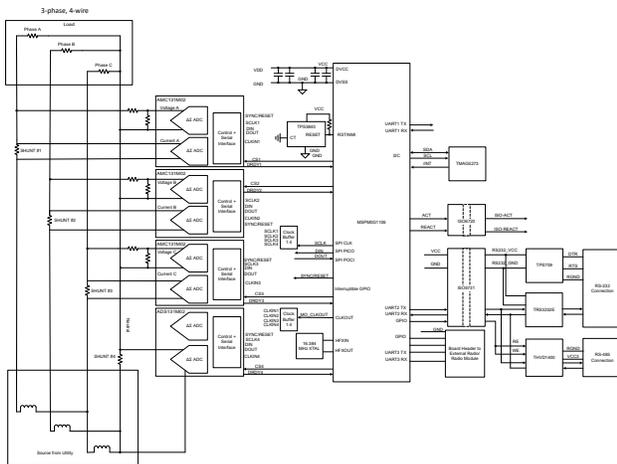
此参考设计使用隔离式高性能多通道模数转换器 (ADC) 实现 0.2S 级三相电能测量, 此转换器在 4kHz 下对分流电流传感器进行采样, 以测量交流电源各相的电流和电压。此参考设计在宽输入电流范围 (0.05A - 100A) 内具有高精度, 还支持实现独立谐波分析等电能质量功能所需的更高采样频率。使用 TI Arm® Cortex®-M0+ 主机微控制器计算计量参数时, 可支持高达 16ksps 的更高 ADC 采样率。

资源

TIDA-010244	设计文件夹
MSPM0-SDK	工具文件夹
MSPM0G3507、AMC131M03	产品文件夹
LMK1C1104、ISOUSB111	产品文件夹
TMAG5273、MSP423E401Y	产品文件夹
RES60A、CDC6C、CC2340R5	产品文件夹



请咨询 TI E2E™ 支持专家

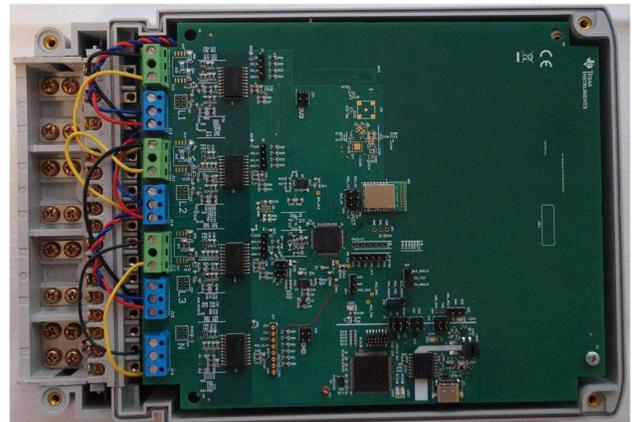


特性

- 电表三相计量, 符合 1000:1 输入范围的 0.2S 级有功电能精度要求
- 支持具有分流的三相四线 (3P4W) 或三相三线 (3P3W) 系统
- 有功和无功电能和功率、均方根 (RMS) 电流和电压、功率因数以及线路频率计算
- 带板载 XDS110 调试探针的隔离式 USB Type-C® 隔离值为 5kV_{RMS}, 在 100mA 至 100A 输入范围和 100V 至 270V 间进行了测试
- 能够使用线性 3D 霍尔效应传感器检测磁篡改
- 能量计量软件, 脉冲输出连接到参考测试系统, 并在 Microsoft® Windows® PC GUI 上显示结果

应用

- 电表
- 电源品质测定器
- 电能质量分析仪
- 交流充电 (桩) 站



1 系统说明

TIDA-010244 是采用四个 4 通道独立隔离式 AMC131M03 ADC 和具有成本效益的 MSPM0G3507 微控制器 (MCU) 的 0.2S 级高精度三相并联电表参考设计。此参考设计还可用于在电动汽车充电器和交流壁挂式充电箱等常用产品中进行电能计量。三个隔离式 ADC 中的每一个 (每相一个) 均感测相应相位 A、B 或 C 上的市电电压和电流, 非隔离式 ADC 则用于通过分流器监测中性线的电流。

TIDA-010244 固件专门支持三相电能测量和一条中性线的多种计量参数计算。可以从校准 GUI 或通过连接到参考测试系统的 ACT 和 REACT 脉冲输出查看这些参数:

- 总的和每相的有功 (kWh)、无功 (kvarh) 和视在电能 (kVAh), 具有脉冲生成输出
- 总的和每相的有功 (kW)、无功 (kvar) 和视在功率 (kVA)
- 每相电压和电流的均方根 (RMS)
- 功率因数
- 线路频率

1.1 主要系统规格

特性	说明
相位数	3 (通过分流器测量每个相电流), 通过电阻分压器测量电压
精度等级	0.2S 级
动态范围	1:10000 (针对 1:2000 或 50mA - 100A 测试精度)
电流传感器	分流器
测试电流范围	0.05 - 100A
测试电压范围	100V - 270V
AMC131M03 CLKIN 频率	8,192,000Hz
AMC131M03 Δ - Σ 调制时钟频率	4,096,000Hz (= CLKIN / 2)
SPI 时钟	19,968,000Hz
过采样率 (OSR)	1024
数字滤波器输出采样率	4,000 个样本/秒
相位补偿实现	软件
相位补偿分辨率	0.0176° (50Hz 时) 或 0.0210° (60Hz 时)
选用的 CPU 时钟频率	79.87MHz
系统标称频率	50Hz 或 60Hz
测量的参数	<ul style="list-style-type: none"> • 有功功率、无功功率、视在功率和电能 • 均方根 (RMS) 电流和电压 • 功率因数 • 线路频率
被测参数的更新速率	约等于 1 秒
通信选项	PC GUI (通过 5kV _{RMS} 隔离式 USB Type-C® 或低功耗蓝牙®连接)
使用的 LED	2 个 LED: 有功电能和无功电能
电路板电源	通过 LDO 为 3.3V 提供 5V, 或直接为 DVCC 导轨和 GND 提供 3V3

1.2 终端设备

电表和电能质量监测仪是两种常用的系统设计, 可实现精确电能测量并符合国际电工委员会 (IEC)、欧洲标准 (EN) 和美国国家标准协会 (ANSI) 标准, 具有用于计算最相关计量参数 (例如总相位和每相位有功 (kWh)、无功 (kvarh) 和视在能量 (kVAh)) 的常见功能。可以计算多相电能测量系统中的多个电能质量参数, 包括:

- 每相位电压总谐波失真 (THD)
- 每相位电流 THD
- 相间电压角度
- 每相位过零

1.3 电表

公用事业提供商和客户越来越需要电表具备更多功能，由于电表的精度要求和预期处理量都在快速增加，因此仅靠单个计量片上系统 (SoC) 解决这些问题是越来越难。

一种常用解决方案是使用带有主机微控制器 (MCU) 的独立 ADC，以同时克服电表 SoC 的处理和精度限制。采用这种双芯片方法，系统设计人员可以混搭最适合 ADC 和 MCU 的器件，并优化系统成本或性能。使用具有集成电源和数据隔离功能的出色、精确、独立式 ADC (例如 AMC131M03) 具有以下优势：

- 能够满足最严格的精度要求
- 能够满足应用特定产品或计量 SoC 有时无法达到的最低采样率要求 (不影响精度)
- 能够灵活选择主机 MCU，因为器件仅需只满足应用要求。这些要求包括：
 - 处理能力 (以 MIPS 为单位)
 - 最小 RAM 和闪存区域
 - 通信模块 (例如串行外设接口 (SPI)、通用异步接收器-发射器 (UART) 和 I2C)、DMA 和 CRC 模块，以及其他一些外设，例如用于提供仪表数据完整性和安全性的安全功能

为了正确测量能耗，电压和电流传感器将市电电压和电流转换为 ADC 可以感测的电压范围。使用多相配电系统时，必须将电流传感器相间隔离，以便传感器可以正确检测从两条、三条或四条不同线路汲取的电流 (在测量中性线时)，而不会损坏 ADC。此设计使用 2 个、3 个或 4 个具有成本效益的分流传感器，这些传感器不受磁干扰影响，并支持为具有可选中性线测量功能的三相星形配置实施电表。

1.4 电能质量监测仪，电能质量分析仪

除了用于电表外，这种单相或多相 ADC 架构还适用于电能质量分析仪和电能质量监测仪以及电动汽车充电器或交流充电器 (也称为壁挂式充电箱)。此终端设备用于帮助公用事业和工业企业测量某些电能质量参数以监测和控制电能质量，如电压谐波、电流谐波、电源电压骤降、电源电压骤升以及其他参数。对于所有设备来说，计算电能质量参数需要大量的计算。此外，满足不同电能质量参数的精度要求也很重要。正如本设计中的做法，对高精度和计算能力的要求是可以通过采用独立式 ADC 和单独主机 MCU 或微处理器单元 (MPU) 器件来充分满足的。

电能质量监测仪和电能质量分析仪通常测量的两个参数是电压谐波和电流谐波。实施相干采样，以实现更准确的谐波计算。实施相干采样的一种方法是根据测量的市电频率动态改变采样时钟，从而使采样率精确地保持为线路频率的倍数。本设计中的独立式 ADC 能够接受变化时钟，因此本设计可以支持相干采样。虽然本设计中独立式 ADC 的时钟可以变化，但本设计不支持相干采样，原因是无法以适当的精细分辨率改变从主机 MCU 到独立式 ADC 的采样时钟。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 展示了基于 MSPM0G3507 和 AMC131M03 的三相电能测量应用方框图。

在每个相位 (或线路) 上都会直接测量相电压以及每条线路 (3 相) 的电流和通过 N (中性) 引线的电流 ; 因此默认情况下支持 3 相 3 引线 (3P3W) 或 3 相 4 引线及中性线 (3P4W) 配置。由于未使用某些相位, 此参考设计还可用于分相型 (相位 C 保持断开) 或单相 (相位 B 和 C 保持断开) 配置。在 TIDA-010244 方框图中, 分流传感器分别连接到 3 个相位, 同时使用简单的分压器来对每条线路的相应电压进行分压, 从而进行电流测量。分流器的选择基于电能测量所需的电流范围, 同时确保在大电流下尽可能降低分流器内的功率耗散。假设要测量的每相最大电流为 100A 或 120A, 则 $150\ \mu\Omega$ 至 $200\ \mu\Omega$ 之间的数值较为常见。

在此设计中, 四个 AMC131M03 或 AMC131M02 器件通过以下方式与 MSPM0+ MCU 交互 :

1. 三个不同的时钟信号馈送到 4 通道输出 LVCMOS 缓冲器 LMK1C1104, 以获取 4 个相同的同相时钟信号 CLKIN1 至 CLKIN4, 从而确保所有 ADC 运行和收集的数据样本彼此同步。
 - a. TI BAW 振荡器 CDC6C 为 LMK1C1104 和 MSPM0G3507 器件提供 8.192MHz 的高精度时钟信号 (默认选项)。
 - b. 一个外部 16.384MHz 晶体振荡器 (XTAL) 为 MSPM0G3507 HFXIN 和 HFXOUT 引脚供电, 并且通过一个 2 分频的内部分压器来创建 8.192MHz 的 M0_CLKOUT 信号 (在未安装 TI BAW 时)。随后, M0_CLKOUT 连接到 LMK1C1104 时钟缓冲器。
 - c. 来自 MSPM0G3507 的 PWM 信号可提供给时钟缓冲器, 以实现评估方面的目的。为了启用 PWM 信号, 前述时钟器件之一需要连接到 HFXIN 和 HFXOUT (可选)。
2. LMK1C1104 的 4 个输出馈送到从 CLKIN1 到 CLKIN4 的四个输入引脚 (每个 ADC 器件一个)。
3. 在四个 AMC131M03 和 AMC131M02 器件中, 每个器件均将 CLKIN 输入进行 2 分频, 并将该值用作 Δ - Σ 调制时钟。
4. SPI_SCK (SPU 总线时钟) 信号 (作为 SPI 控制器的 MCU 的输出) 输入到第二个 4 通道输出 LVCMOS 缓冲器 LMK1C1104, 以便为 SPI 数据传输获取四个相同的同相时钟信号。
5. 四条 SPI_SCK 线路 (SCLK1 至 SCLK4) 被馈送到每个 ADC 的 SCLK 输入端, 从而确保所有 ADC 都在共享 SPI 总线上同步运行。
6. 使用了四条单独的 \overline{CS} 线路, 这些线路由 MSPM0+ MCU 的 SPI 外设自动生成和控制。
7. 当新的 ADC 样本就绪时, 每个 AMC131M03 都会将 \overline{DRDY} 输出引脚 ($\overline{DRDY1}$ 至 $\overline{DRDY4}$) 置为有效, 从而提醒 MCU 有新的数据样本可用。
8. 检测到 \overline{DRDY} 下降沿后, MSPM0+ MCU 使用 DMA 模块中的一个 SPI 和两个 DMA 通道, 从各 AMC131M0X 器件读入电压和电流样本。四个独立 ADC 同时生成四个 \overline{DRDY} 信号, 但由于 ADC 共享同一个 SPI 总线, MCU 将按顺序读取 ADC。
9. MCU 还通过电路板上 XDS110 调试程序的 USB Type-C 接口或外部 FTDI 连接器与 PC GUI 进行通信。
10. 来自 MCU 的 ACT 和 REACT 输出信号表示用于精确测量和校准的有功和无功电能脉冲。这两个信号都是根据参考表校准电表所需的关键信号。

MSPM0+ MCU 具有内部上电复位 (POR) 以及 POR 和欠压复位 (BOR) 电源监测器, 该监测器具有四个可配置的阈值电压。

此参考设计可通过 USB Type-C 连接器或标记的接头施加 5V 电压, 或在指定接头引脚上施加 3.3V 电压。有关为电路板供电的正确跳线连接的详细信息, 请参阅节 3.3.2。

USB Type-C 接口可用于对 MSPM0G3507 进行编程和调试。该接口为隔离式, 可用于通过 USB 电源向系统提供 5V 供电。如果选择 5V 选项, 则 USB Type-C 接口的隔离不会生效。

此参考设计还提供了两种通过蓝牙传输计量参数数据的选项: 一种是使用带全无源器件 (分立式实施) 的 CC2340 蓝牙低功耗子系统, 另一种使用基于 CC2340 的蓝牙模块。

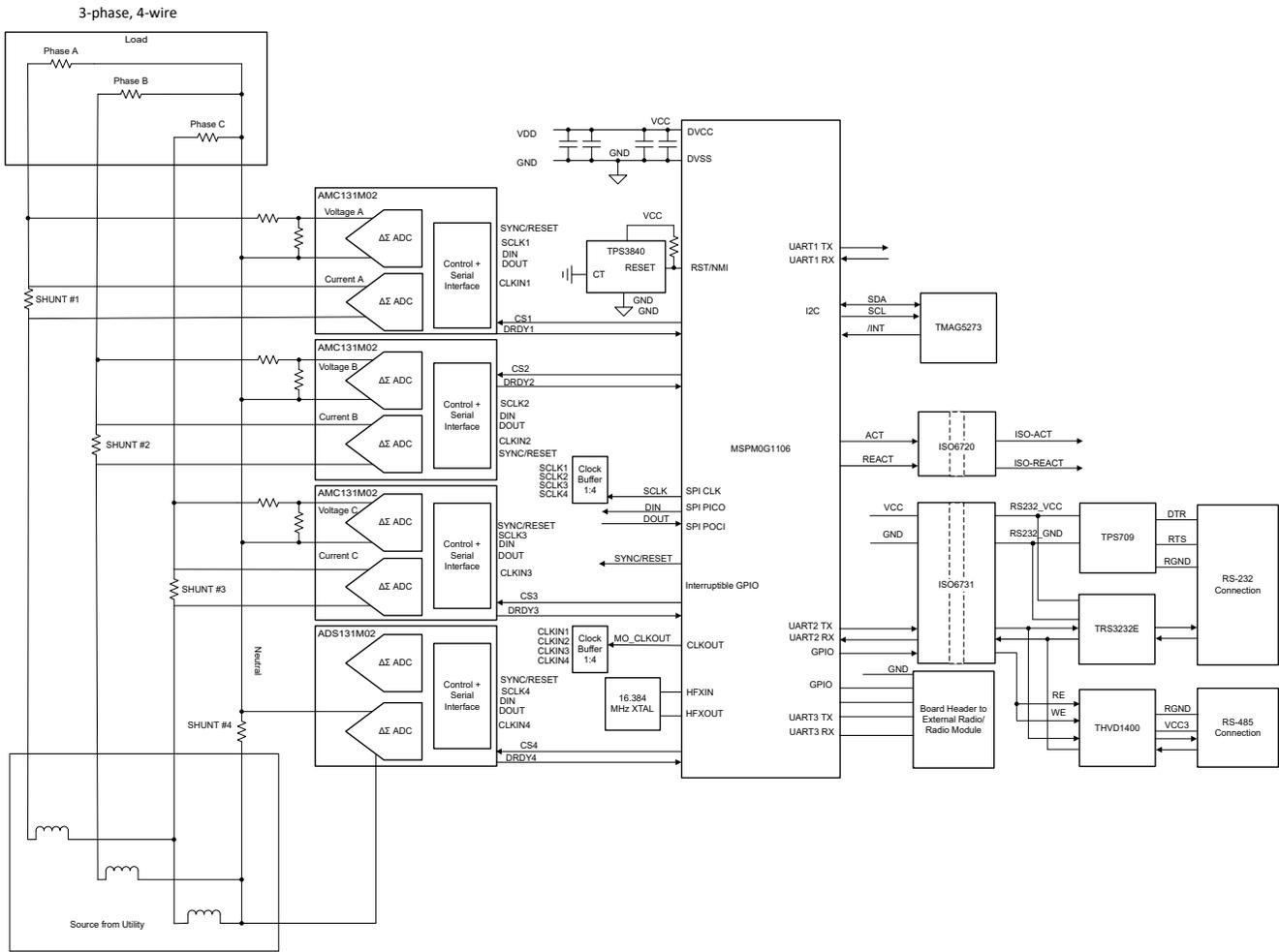


图 2-1. 基于 MSPM0G3507 和 AMC131M03 的三相电能测量方框图

2.2 设计注意事项

虽然在该 PCB 上使用了四次 AMC131M03，但如果只需要测量电流和电压，双通道版本 AMC131M02 足以满足需求。AMC131M03 中的第三个通道（在 AMC131M02 中未出现）可根据需要支持在分流传感器上进行温度测量。

为电压通道选择的分压电阻器要确保对市电电压进行分压后符合 AMC131M03 器件的正常输入电压范围。该独立式 ADC 具有较大的动态范围，而测量电压时只需较小的范围，因此特意选择了电压前端电路，使 ADC 电压通道输入端的最大电压落在满量程电压范围内。通过降低馈送到 AMC131M03 电压输入通道的电压，电压-电流串扰（对计量精度的实际影响大于对 ADC 电压通道精度的影响）会减小（电压精度也会降低），从而在较低的电流下实现更准确的电能测量。

2.2.1 电压测量模拟前端

全球许多地区市电的标称电压为 100V 至 240V，因此需要按比例降低电压，才能被 ADC 检测。图 2-2 显示了用于此电压调节的模拟前端，在 J11 上为 C 相施加电压，每个 A 相和 B 相也使用类似的电路。

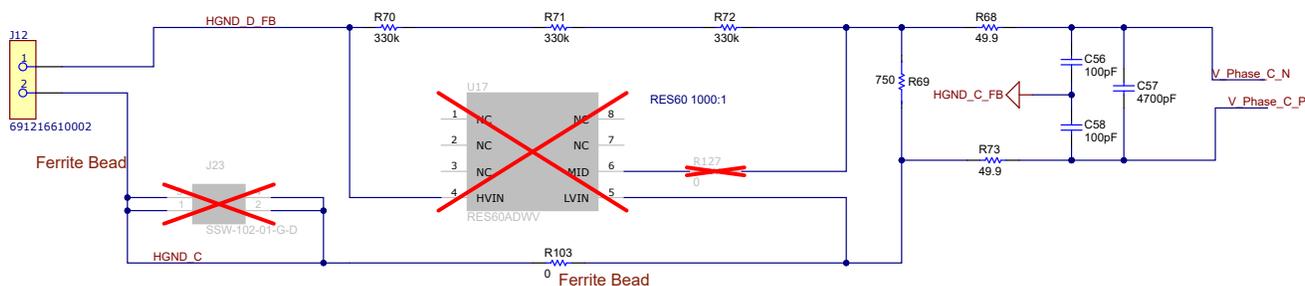


图 2-2. 电压输入的模拟前端

电压输入的模拟前端有一个分压器网络 (R70、R71、R72 和 R69) 和一个 RC 低通滤波器 (R68、R73、C56、C57) 以及 C58，如 图 2-2 中所示。

或者，可以选择添加一个高精度电阻分压器 RES60A (U17)。该电阻分压器以 1000:1 的比率降低电压，是具有 R70、R71、R72 和 R69 的分立式分压器的替代方案。若要使用 RES60A 而不是串联电阻链分压器网络，、请更改以下元件：

- 移除 R69、R70、R71 和 R72
- 放置 R127 (0 Ω)
- 放置 RES60A

对 A 相和 B 相执行类似的步骤。

在较小电流下，如果不执行功率偏移量校准，电压-电流串扰对有功电能精度的影响要远大于对电压精度的影响。为了更大限度地提高在较低电流下的精度，在本设计中，电压通道并未使用整个 ADC 范围。即使在该设计中对电压通道使用减小的 ADC 范围，仍可为测量电压提供足够的精度。方程式 1 显示了在给定的市电电压和选定的分压器电阻值下，如何计算馈入 ADC 电压通道的差分电压范围。

$$V_{\text{ADC_Swing, Voltage}} = \pm V_{\text{RMS}} \times \sqrt{2} \left(\frac{R_{69}}{R_{70} + R_{71} + R_{72} + R_{69}} \right) \quad (1)$$

根据此公式和 方程式 1 中选定的电阻值，对于 120V 市电电压 (在线及中性线间测得)，ADC 电压通道输入信号的电压摆幅为 $\pm 128.47\text{mV}$ ($90.8\text{mV}_{\text{RMS}}$)。对于 230V 市电电压 (在线及中性线间测得)，前端电路的 230V 输入会产生 $\pm 246.23\text{mV}$ ($174.11\text{mV}_{\text{RMS}}$) 的电压摆幅。 $\pm 128.47\text{mV}$ 和 $\pm 246.23\text{mV}$ 电压范围均完全处于 -1.3V 至 $+2.7\text{V}$ 范围内 (如果增益=1，请参阅 [具有集成式 DC/DC 转换器的 AMC131M03 三通道、64kSPS、同步采样、24 位增强型隔离式 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#) 数据表的 [建议运行条件](#) 部分)，ADC 可感应电压。

2.2.2 用于电流测量的模拟前端

图 2-3 展示了用于电流输入的模拟前端不同于用于电压输入的模拟前端。

来自分流传感器的正极和负极引线连接到接头 J15 的引脚 3 和 2 (对于 C 相)。A 相和 B 相使用相同的分压器电路、其中端子块 J13 和 J14 是分流器端子的连接器。

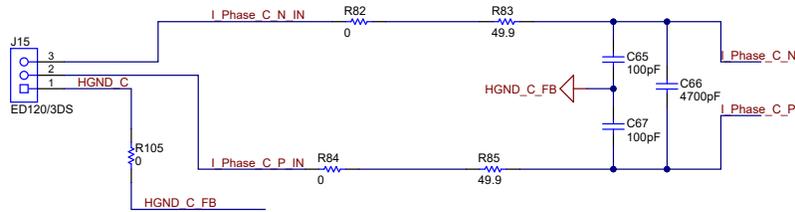


图 2-3. 电流输入的模拟前端

电流的模拟前端包括电磁干扰滤波器磁珠占用区 (R82、R84 和 R105)、RC 低通滤波器占用区 (R83、R85、C65、C66)，以及用作抗混叠滤波器的 C67。

方程式 2 显示了如何针对给定最大电流、CT 匝数比和负载电阻值计算馈入电流 ADC 通道的差分电压范围。

$$V_{\text{ADC}_{\text{Swing,Current,Shunt}}} = \pm\sqrt{2}(R_{\text{shunt}})I_{\text{RMS,max}} \quad (2)$$

假设分流电阻值为 $150 \mu\Omega$ ，当施加仪表的最大额定电流 (例如 100A) 时，电流 ADC 的输入信号的电压摆幅为 $\pm 21.21\text{mV}$ 。当使用“增益 = 32”时，该相对较低的电压完全处于 $\pm 37.5\text{mV}$ 的所需满量程之内、请参阅[具有集成式 DC-DC 转换器的 AMC131M03 3 通道、64-kSPS、同步采样、24 位增强型隔离式 \$\Delta-\Sigma\$ ADC](#) 数据表中的满量程表。

2.2.3 XDS110 仿真器

此参考设计附带板载 XDS110 仿真器。该仿真器在 MSP432E401Y 器件中实现，该器件包含 UART 转 USB 转换器，还负责对 MSPM0 和 CC2340 低功耗蓝牙器件进行编程。要使用 XDS110 仿真器软件对 MSP432E401Y MCU 器件进行编程，请连接跳线，从而通过 USB Type-C 连接器为电路板和 PC 提供 5V 电压。从[XDS 仿真软件 \(EMUPack\) 下载](#)页面将 XDS110 软件下载到 PC 上，然后按照 XDS110 用户指南中的说明刷写 MSP432 MCU。成功刷写器件后，蓝色 LED 3 亮起，并且两个 COM 端口在设备管理器中可见。

要刷写 MSPM0、低功耗蓝牙模块或芯片、请查看专门的章节[跳线设置](#)和[蓝牙数据传输](#)。

2.2.4 Bluetooth® 数据传输

此设计实现了低功耗蓝牙连接，可通过 HY-234004P 低功耗蓝牙模块或 CC2340 器件建立连接。因此，两个蓝牙器件之间可以进行双向通信，并可通过 UART 连接连接到计算机。

2.2.5 两个模块之间的 Bluetooth® 连接

建议执行以下步骤来测试两个蓝牙器件之间的通信：

1. 设置跳线 JP6 和 JP7 以启用蓝牙连接（两者均为位置 1-2）。
2. 通过具有 USB Type-C 连接器的电缆将 PC 与 [SmartRF Studio 8](#) 应用连接起来。
3. 启动 [SmartRF Studio 8](#) 应用。
4. 点击出现在 XDS110 连接窗口中的 CC2340R5。
5. 在 RX 和 TX 选项卡中，首先点击接收器上的 *开始测试*，然后再次点击 *开始测试* 以启动发送器。

2.2.6 Bluetooth® 到 UART 连接

要运行从命令行工具向 TI 应用程序发送数据的测试，请执行以下步骤：

1. 为蓝牙连接设置跳线 JP6 和 JP7。
2. 使用 J9 XDS110 侧的引脚，通过跳线将 JP8 的 HY_RX 和 JP9 的 HY_TX 分别连接到 J9 的 RX 和 TX。
3. 下载 GitHub 上提供的 [蓝牙低功耗到 UART 连接示例](#)。
4. 下载 [SimpleLink 低功耗 F3 SDK \(7.40.00.64\)](#)。
5. 将 data_stream_UART_over_BLE 示例从 GitHub 复制到 <root source folder>
`\simplelink_lowpower_f3_sdk_7_40_00_64\examples\rtos\LP_EM_CC2340R5\ble5stack`。
6. 在 Code Composer Studio™ (CCS) 中构建和编译项目。
7. 连接 USB Type-C 电缆，并将代码刷写到电路板中。
8. 运行代码并通过 PuTTY 或 TerraTerm 打开命令行终端。
9. 下载适用于 iPhone® 或 Android® 智能手机的 SimpleLink Connect 移动应用程序，并连接到 *DataStream UART*。
10. 在应用程序或终端中写入，文本会显示在对侧设备中。

2.2.7 使用 TMAG5273 线性 3D 霍尔效应传感器进行磁篡改检测

在电表附近加一块强力永磁体或交流磁体来篡改电表是一种常见的非侵入式窃电方法。永磁体或交流磁场会影响一些电表元件，比如电流互感器电流传感器、分流器电流传感器（分流器仅受交流磁体影响）或任何电源变压器。由于这些组件容易受到磁篡改这一劣势，公用事业客户的电力收费会减少，从而实质上使消费者产生窃取电力的行为。

考虑到仪表容易遭受磁篡改，仪表中通常会使用磁传感器来检测外部磁场，进而采取适当的措施，如中断电表服务或对磁篡改处以罚款。在这种设计中，磁篡改检测由 TMAG5273 线性 3D 霍尔效应传感器来完成，与其他磁感应器件和设计相比，它具有以下优势：

- **易于组装：**霍尔传感器通常不像簧片开关那样脆弱，不会在组装过程中断裂。
- **只需一个表面贴装 IC：**TMAG5273 进行三向感应只需一个表面贴装 IC 用于 3D 线性霍尔效应传感器，而不像 1D 霍尔效应传感器需要三个 IC。3D 线性霍尔效应传感器可实现更紧凑的印刷电路板 (PCB) 布局布线。此外，1D 霍尔效应传感器方案需要通孔传感器来检测某些方向，与之相比，仅采用表面贴装的实现方案可以降低 PCB 制造成本。
- **灵活定义磁篡改阈值：**由于 3D 线性霍尔效应传感器提供的是与实际检测的磁通密度值相关的信息，因此可以选择每个轴的磁篡改阈值，只要在 3D 线性霍尔效应传感器的磁感应范围内即可。这样便可以配置对篡改的定义，该定义可能因设计而异，这是因为所检测的磁通量密度依赖于磁体到传感器的距离，以及待检测外部磁体的特性。对于具有固定磁性工作点 (B_{OP}) 阈值的霍尔效应开关来说，无法实现这样的灵活性。为了找到适当的篡改阈值定义，可以使用 [磁性计算工具](#)，以便确定在不同磁体与传感器距离以及必须检测的磁体类型下的最终磁通密度。然后可以设置磁性阈值，使之低于传感器在暴露于预期篡改情况时的磁通密度。通常，最佳做法是将阈值设置得足够小，以便检测出篡改磁体，同时也要足够大，确保当附近的设备产生不影响仪表功能的磁场时，系统不会出现误报。磁体与传感器距离依赖于传感器在 PCB 上的位置以及电表外壳的尺寸。对于小型系统，可以将磁传感器放置在电路板中心附近，使整个仪表外壳实现对称检测覆盖，或者可以将磁传感器放置在会受磁篡改影响的任何组件旁。对于大型系统，比如某些多相仪表，有时仅凭一个磁传感器无法检测整个仪表表面的篡改，因此可以使用多个 3D 霍尔传感器，将它们彼此摊开放置在 PCB 上，以便覆盖较大的检测区域。TMAG5273 有四组可订购器件，它们在出厂时预设了不同的 I2C 地址，从而使多个器件能够共享相同的 I2C 总线。

- **能够在多个器件功率模式之间进行变换：**TMAG5273 支持在多个功率模式之间切换，具体取决于是否需要降低系统电流消耗。TMAG5273 具有进行测量的工作模式、电流消耗极低的睡眠模式，以及会在工作模式和睡眠模式之间自动切换的占空比模式。下面描述了电表不同功率模式的典型用例：
 - 工作模式用于进行测量，在不同的功率模式中所需的功率最大。一个示例场景是，当可使用市电，并且仪表由交流/直流电源供电时，通常会使用工作模式。由交流/直流电源供电时，TMAG5273 相对较高的工作模式电流消耗 (2.3mA) 可以忽略不计。
 - 在占空比模式下，器件会进行测量，然后在用户指定的一段时间内自动进入睡眠状态。占空比模式有益于在检测磁篡改的同时尽可能降低电流消耗，如在使用备用电池运行时，需要进行低速磁篡改检测。要降低占空比模式下的平均电流消耗，可以选择较长的睡眠时间。选择睡眠时间时，应将睡眠时间设置为小于所需的磁测量响应时间。例如，如果要使用唤醒和睡眠模式每 2ms 检测一次磁篡改，请将睡眠时间设置为 1ms，而不是 1 秒。
 - 在睡眠模式下，器件不会进行任何磁性测量。唤醒和睡眠模式的替代方法是，通过 MCU 将传感器手动设置为睡眠模式，然后经过所需的睡眠时间，手动将传感器设置为唤醒状态。这需要更多的 MCU 开销；但是，如果 MCU 要拥有唤醒和睡眠模式，从而允许 MCU 在每个唤醒和睡眠模式周期内重新配置 TMAG5273，则该选项可以降低系统电流消耗。如果系统不需要在使用备用电池运行时检测磁篡改，可以在使用电池运行时，直接使 TMA5273 进入睡眠模式，以便降低系统电流消耗，然后在系统能够再次使用交流/直流电源时恢复工作模式。
- **检测到磁篡改时 GPIO 引脚中断（依赖于器件）：**当检测到任何轴的磁通密度超过用户定义的磁性开关阈值时，TMAG5273 能够设置一个中断引脚。为了检测篡改，用户可以将用于中断的磁性开关点设置为所需的磁篡改阈值。当 MCU 处于低功耗模式时，霍尔效应传感器的中断引脚可以唤醒微控制器，并且微控制器无需读取霍尔效应传感器即可确定是否存在磁篡改，因此 MCU 可在使用备用电源运行时进入低功耗模式，直到被霍尔效应传感器的中断引脚唤醒。同时使用通用输入/输出 (GPIO) 引脚中断功能和占空比功率模式时，可以降低系统电流消耗，延长备用电源的使用时长。当霍尔效应传感器的 GPIO 引脚唤醒微控制器后，MCU 随后可检索导致中断的磁场读数检测值，然后再次使用 GPIO 中断启用唤醒和睡眠模式。
- **交流磁体检测：**交流磁体不仅会影响电流互感器，还会影响分流器和罗氏线圈电流传感器。要检测交流磁体，也可以使用线性 3D 霍尔传感器。如 图 2-4 所示，检测交流磁体需要足够快的有效采样周期和足够短的睡眠时间，以便在一个交流磁体波形周期内正确采集足够多的样本。有效采样周期相当于获取一组样本所需的时间，取决于器件的内部采样率。由于线性霍尔传感器会提供与实际检测的磁通密度相关的信息，因此相比低采样率霍尔开关，这些传感器能够更好地检测交流磁体。

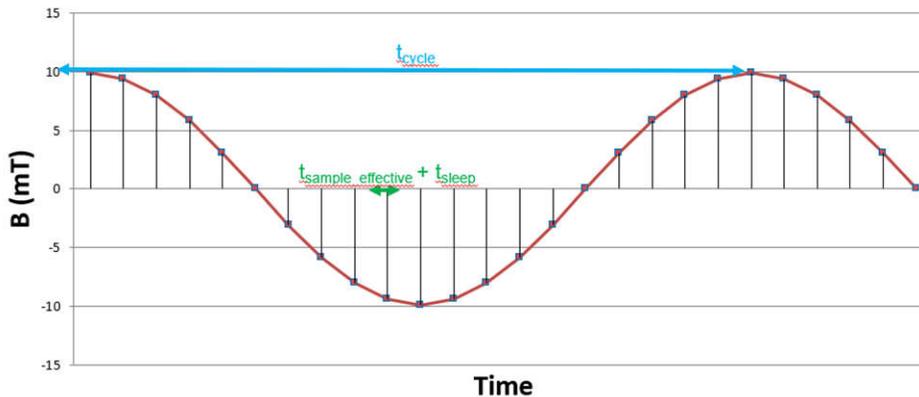


图 2-4. 检测交流磁体

2.3 重点产品

2.3.1 MSPM0G3507

MSPM0G 器件系列集成有一个 Arm 32 位 Cortex-M0+ CPU，其中包含存储器保护单元，时钟频率高达 80MHz，还有两个 SPI，其中一个支持高达 32Mbits/s。其他用于进行能量计算的相关外设包括，具有日历功能的实时时钟 (RTC)、CRC-16 或 CRC-32 硬件模块、四个 UART、两个 1Mbit/s 的 I2C 和高达 60 个 GPIO。

此设计中的 MSPM0+ MCU 会从四个 ADC 器件检索电压和电流样本，并且计算计量参数。此外，该器件还通过 RTC 模块跟踪记录时间，使用其中一个 UART 接口，借助电路板的隔离式 USB 接口与 PC GUI 进行通信。MSPM0+ MCU 的 CRC16 硬件模块用于加速 CRC 计算，进而验证由 ADC 发送的 ADC 采样数据包的完整性。

MSPM0G3507 的主要特性是工作温度范围：-40°C 至 105°C；宽电源电压范围：1.62V 至 3.6V；以及具有内置纠错码 (ECC) 的集成式 64KB 闪存和带硬件奇偶校验的 32KB ECC 保护 SRAM。

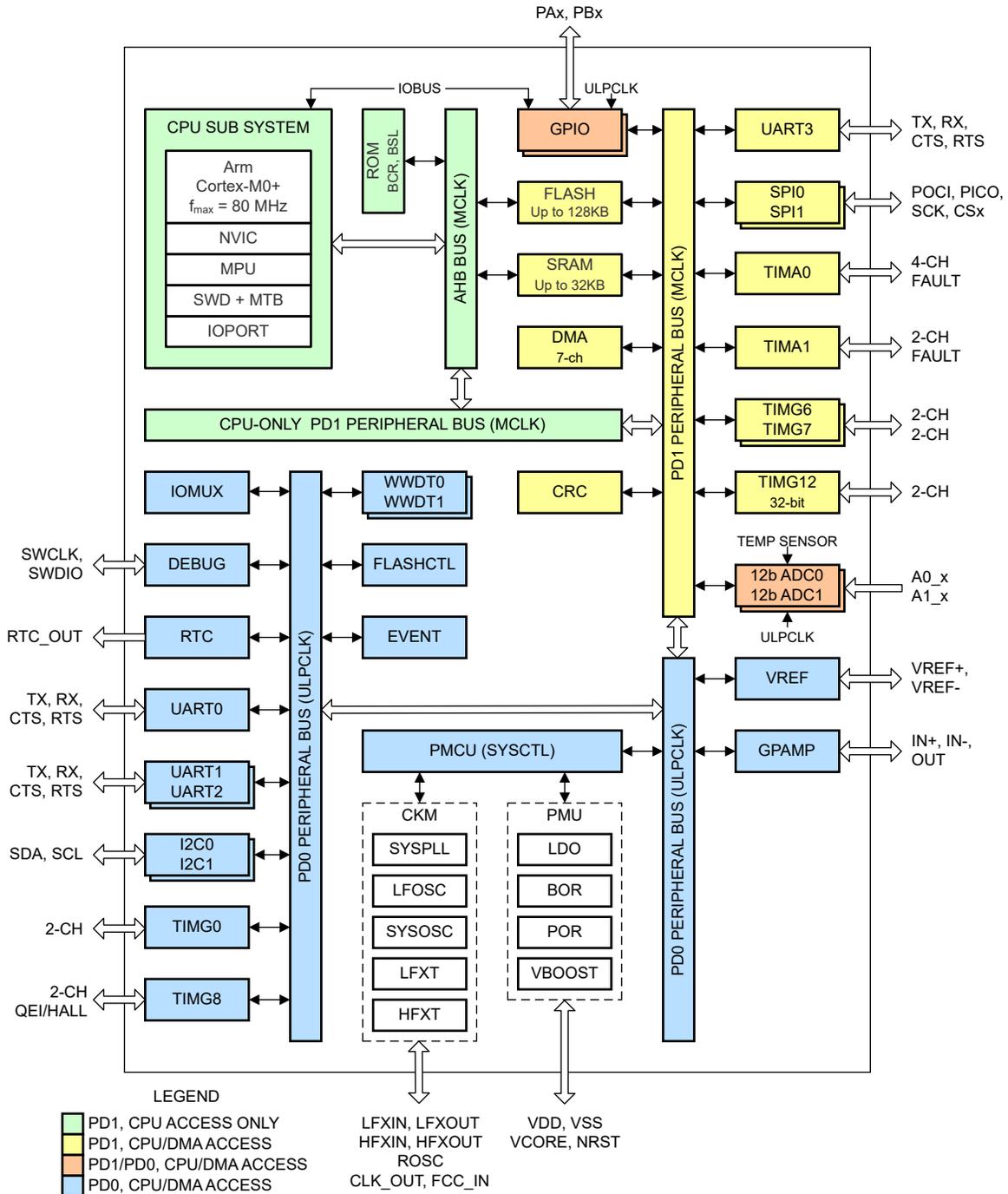


图 2-5. MSPM0G3507 功能方框图

2.3.2 AMC131M03

AMC131M03 是一款精密的三通道数据和电源隔离式同步采样 24 位 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)。

AMC131M03 具有宽动态范围、低功耗和特定于电能测量的功能，因此非常适合电能计量和功率计量应用。由于该器件具有高输入阻抗，因此 ADC 输入可直接连接到电阻分压器网络或分流传感器。

AMC131M03 具有完全集成式、隔离式 DC/DC 转换器，能实现器件低侧的单个电源操作。增强型电容隔离栅已通过 VDE V 0884-11 和 UL1577 认证。该隔离栅将在不同共模电压电平下运行的系统器件分开，并保护低压器件免受损坏，使 AMC131M03 成为使用分流传感器的多相电能计量应用的理想选择。

三个隔离式同步采样 $\Delta\Sigma$ ADC 通道采用差分输入和单电源运行（3.3V 或 5V），并具有 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的集成式直流/直流转换器。该器件经优化可实现低 EMI，符合 CISPR-11 和 CISPR-25 标准，并具有安全相关认证：符合 DIN EN IEC 60747-17 (VDE 0884-17):2021-10 的 7070V_{PEAK} 增强型隔离以及长达 1 分钟的 5000V_{RMS} 隔离，符合 UL1577 标准。

可编程数据速率最大为 64ksps，包含高达 128 的可编程增益、低漂移内部电压基准和内部温度传感器。通过带有循环冗余校验 (CRC) 功能的 4 线 SPI 访问数据和寄存器。

如果不需要第 3 个输入通道（例如，使用 1% 100k Ω 线性热敏电阻 TMP63 进行温度测量），可以使用非常类似的 AMC131M02 通道器件作为具有成本效益的替代方案。

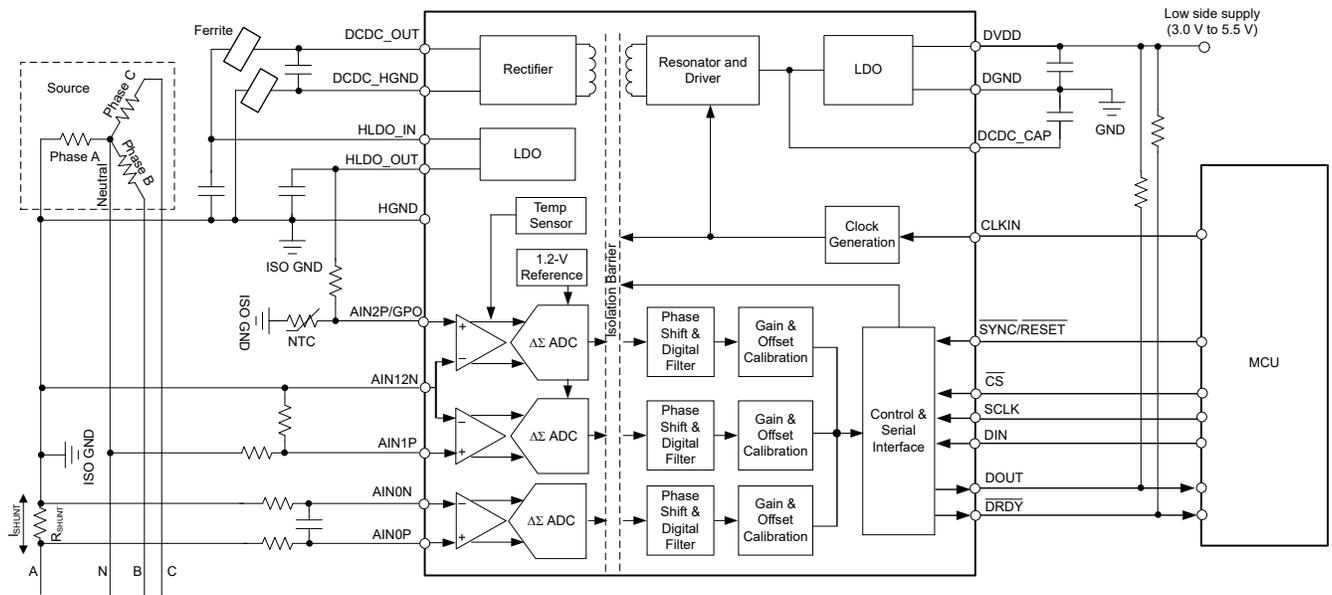


图 2-6. AMC131M03 功能方框图

2.3.3 CDC6C

德州仪器 (TI) 的体声波 (BAW) 是一种微谐振器技术，能够将高精度 BAW 谐振器直接集成到具有低抖动时钟电路的封装中。与其他硅基制造工艺一样，BAW 完全由 TI 工厂设计和制造。CDC6C 器件是一个低抖动、低功耗的固定频率振荡器，采用 BAW 作为谐振器源。工厂根据特定频率和功能引脚配置进行编程。借助频率控制逻辑和输出频率分频器，CDC6Cx 可在指定范围内生成任意频率，提供可满足所有频率需求的单个器件系列。该器件的高性能时钟、机械稳定性、低功耗和小型封装选项专为工业、通信、数据和企业网络及个人电子产品终端设备中的基准时钟和核心时钟而设计。

2.3.4 RES60A-Q1

RES60A-Q1 是一款匹配电阻分压器，采用薄膜 SiCr 技术和德州仪器 (TI) 的现代、高性能模拟晶圆工艺实现。高质量 SiO₂ 绝缘层封装了电阻器，因此可在极高的电压下使用，持续运行时电压高达 1400VDC，HiPOT 测试 (60s) 时电压高达 4000VDC。该器件具有 $R_{HV} = 12.5M\Omega$ 的标称输入电阻，并提供多种标称比率以满足各种系统需求。RES60A-Q1 系列具有高比率匹配精度，所测量的每个分压器的比率处于标称值的 $\pm 0.1\%$ (最大值) 以内。该精度在额定温度范围内和老化期间保持不变，累积漂移仅为 $\pm 0.2\%$ (最大值)。因此，未经校准的 RES60A-Q1 在使用寿命内的容差保持在 $\pm 0.3\%$ (最大值) 范围内。RES60A-Q1 符合汽车 AEC-Q200 温度 1 级标准，额定温度范围为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。该器件采用 8 引脚 SOIC 封装，标称封装尺寸为 $7.5\text{mm} \times 5.85\text{mm}$ ，在高压引脚和低压引脚之间具有至少 8.5mm 的爬电距离和间隙距离。

2.3.5 TPS3702

TPS3702 是一款集成型过压和欠压窗口电压检测器，采用小型 SOT-6 封装。这款高精度电压检测器非常适合由低压电源轨供电且电源容限较窄的系统。该器件提供有 0.55% 和 1.0% 两个低阈值迟滞选项，可防止在受监视电源电压处于其标称工作范围内时出现错误的复位信号。并且内置毛刺抑制功能和噪声滤波器，进一步消除了错误信号所导致的错误复位。TPS3702 无需使用任何外部电阻即可设置过压和欠压复位阈值，因此进一步提高了总体精度、减小了设计尺寸并降低了设计成本。每款器件的两种可用阈值电压可使用 SET 引脚进行选择。独立的 SENSE 输入引脚和 VDD 引脚可满足安全关键型和高可靠性系统对于冗余的需求。该器件还为过压 (OV) 和欠压 (UV) 引脚提供了独立复位输出；可采用开漏配置将 UV 和 OV 引脚连接在一起。该器件具有 $7\mu\text{A}$ 的低典型静态电流规格、符合在 -40°C 至 125°C 的工业级温度范围内使用的条件。

2.3.6 TPD4E05U06

TPDxE05U06 是基于单向瞬态电压抑制器 (TVS) 的静电放电 (ESD) 保护二极管产品系列，具有超低电容。每个器件的 ESD 冲击消散值高于 IEC 61000-4-2 国际标准规定的最高水平。TPDxE05U06 超低负载电容特性使得该器件非常适合保护任何高速信号引脚。TPDxE05U06 的典型应用包括 HDMI 1.4b、HDMI 2.0、USB 3.0、MHL、LVDS、DisplayPort、PCI-Express®、eSata 和 V-by-One® HS 中的高速信号线。

2.3.7 ISOUSB111

ISOUSB111 是一款兼容 USB 2.0 的电气隔离式中继器，支持低速 (1.5Mbps) 和全速 (12Mbps) 信令速率。该器件支持自动连接和速度检测、上拉和下拉反射以及链路电源管理，因而能够实现插入式 USB 集线器、主机、外设和电缆隔离。该器件还支持自动角色交换。如果连接断开后在上行端口上检测到新的连接，上行和下行端口定义将会调换。此功能使器件能够支持 USB On-The-Go (OTG) 和 USB Type-C 双角色端口 (DRP) 实现。该器件采用二氧化硅 (SiO₂) 绝缘隔栅，可承受 $5000 V_{\text{RMS}}$ 的电压和 $1500 V_{\text{RMS}}$ 的工作电压。与隔离式电源一起使用，此器件可抵御高电压冲击，并防止总线的噪声电流进入本地接地。ISOUSB111 器件可用于增强型隔离。ISOUSB111 还支持 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 的宽环境温度范围，该器件采用独立 SOIC-16 (16-DW) 封装和较小的 SSOP-16 (16-DWX) 封装。

2.3.8 LMK1C1104

LMK1C110x 是德州仪器 (TI) 的一款模块化、高性能、低偏斜、通用时钟缓冲器系列器件。整个系列采用模块化方法设计。提供三个不同的扇出选项：1:2、1:3、1:4。该系列所有器件均互相引脚兼容，并兼容 CDCLVC110x 系列，便于操作。该系列所有器件均具有相同的高性能特性，如低附加抖动、低偏斜和宽工作温度范围。

LMK1C110x 具有同步输出使能控制端 (1G)，可在 1G 处于低电平时将输出切换为低电平状态。这些器件具有失效防护输入，可防止在没有输入信号的情况下输出发生振荡并允许在提供 VDD 之前输入信号。LMK1C110x 系列可在 1.8V、2.5V 和 3.3V 电压下工作，其特点是可在 -40°C 至 125°C 的范围内运行。

2.3.9 MSP432E401Y

SimpleLink MSP432E401Y Arm Cortex-M4F 微控制器可提供顶级性能和高级集成。本产品系列适用于需要大量控制处理能力和连接能力，同时要求具有成本效益的应用。MSP432E401Y 微控制器集成了各种富通信功能，以启用高度连接设计的新类别，从而可以在性能和功耗间进行关键和实时的控制。这些微控制器具有集成式通信外设以及其他高性能的模拟和数字功能，为开发从人机界面 (HMI) 到联网系统管理控制器在内的许多不同目标应用奠定了坚实的基础。此外，MSP432E401Y 微控制器为基于 ARM 的微控制器提供了诸多优势，如广泛可用的开发工具、片上系统 (SoC) 基础架构，以及庞大的用户社区。此外，这些微控制器采用兼容 Arm Thumb® 的 Thumb-2 指令集，以减少内存要求，并且借此降低成本。使用 SimpleLink MSP432™ SDK 时，MSP432E401Y 微控制器与 SimpleLink 系列的所有成员代码兼容，因此使用灵活，可满足各种精确的需求。MSP432E401Y 器件是 SimpleLink 微控制器 (MCU) 平台的一部分，该平台包括 Wi-Fi®、低功耗 Bluetooth®、Sub-1GHz、以太网 ZigBee®、线程和主机 MCU，它们共用一个通用、易于使用的开发环境，其中包含单核软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集。

2.3.10 TPS709

TPS7A37 系列线性低压降 (LDO) 电压稳压器在电容器电压输出器配置中使用了 NMOS 旁路元件。该拓扑对输出电容器值和等效串联电阻 (ESR) 的敏感度相对较低，支持实现多种负载配置。即使使用 1μF 的小型陶瓷输出电容器，也能实现出色的负载瞬态响应。NMOS 拓扑结构也可实现超低压降。TPS7A37 系列利用先进的 BiCMOS 工艺实现高精度，同时提供超低的压降和低接地引脚电流。未启用时，电流消耗低于 20nA，是便携式应用的绝佳选择。这些器件受到热关断和折返电流限制的保护。

2.3.11 TMAG5273

TMAG5273 是一款低功耗线性 3D 霍尔效应传感器，适用于各种工业和个人电子产品应用。此器件在 X、Y 和 Z 轴集成三个独立的霍尔效应传感器。精密模拟信号链和集成的 12 位 ADC 使测量的模拟磁场值数字化。在支持多个工作 VCC 范围的同时，I2C 接口可实现与低电压微控制器的无缝数据通信。该器件集成了温度传感器，可用于多种系统功能，例如给定磁场的热预算检查或温度补偿计算。可以通过 I2C 接口来配置 TMAG5273，以实现磁轴和温度测量的任意组合。此外，该器件可以配置为各种电源选项（包括唤醒和睡眠模式），从而支持设计人员根据其系统级需求优化系统功耗。多个传感器转换方案和 I2C 读取帧有助于优化吞吐量和准确性。专用的 INT 引脚可以在低功耗唤醒和睡眠模式期间充当系统中断，也可以被微控制器用来触发新的传感器转换。超低功耗是指 2.3mA 工作模式电流、1 μ A 唤醒电流和仅 5nA 的睡眠模式电流。

TMAG5273 在 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 温度范围内工作，电压范围介于 1.7V 至 3.6V 之间，最大 I2C 时钟速度为 1MHz。

TMAG5273 是一款专为电表设计的线性 3D 霍尔效应传感器。TMAG5273 有四个不同的出厂编程 I2C 地址。通过修改用户可配置的 I2C 地址寄存器，该器件还支持其他 I2C 地址。图 2-7 展示了 TMAG5273 如何定义 X、Y 和 Z 方向。

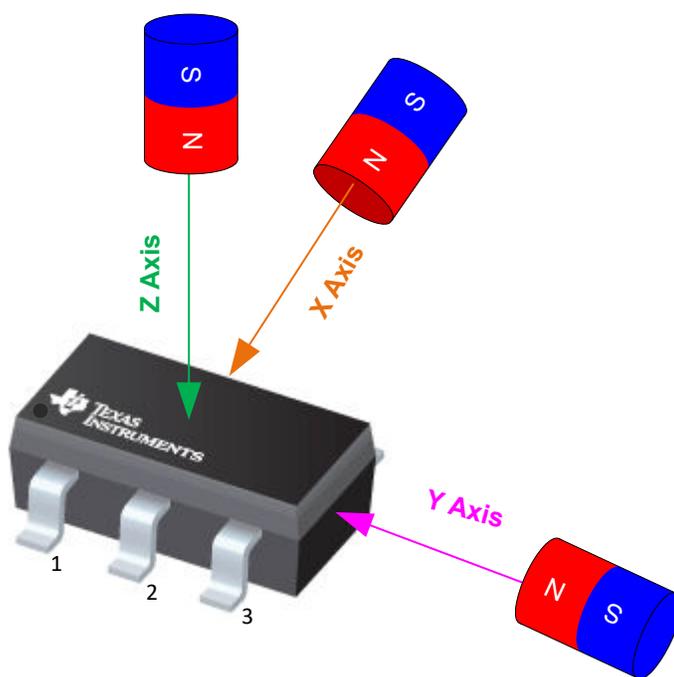


图 2-7. 场方向定义

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

MSPM0G3507 器件为运行计量库提供最低限度的资源，并具有连接独立 ADC 和 PC GUI 所需的外设：

- 使用外部 BAW 或 XTAL 的 HF 时钟子系统
- 具有 DMA 的 SPI (独立 ADC 与 MSPM0 MCU 之间的数据传输)
- 具有 DMA 的 UART (外部 PC GUI 和 MSPM0 MCU 之间的数据传输，用于获取校准和计量值读数)
- GPIO (具有中断的输入或用于 LED 和 ADC 控制的输出)
- 适用于 TMAG5273 接口的 I2C
- 可选 RTC (日历模式基于内部 LFOSC 的 32.768kHz 频率)

所有外设或 MCU 模块均使用 **SYSCONFIG** 图形化工具，通过 SDK 中间件内的 **TIDA-010244.syscfg** 文件进行配置。此工具支持轻松直观地更改 GUI，取代了传统的低级 MCU 寄存器访问。

3.1.1 计时系统

此参考设计附带三个不同选项，可在 **LMK1C1104** 上提供必要的时钟输入，以驱动四个相同的同相时钟信号 **CLKIN1** 至 **CLKIN4**、从而确保所有 ADC 以相互同步的方式运行和收集数据样本。**BAW** 和 **XTAL** 配置均测试成功，但未测试 **PWM** 选项。

MSPM0G3507 MCU 配置为将 CPU 时钟 (**MCLK**) 设置为 79.87MHz，将所有 **AMC131M03** 设备的 **M0_CLKOUT** 时钟信号设置为 8.192MHz、16.384MHz 或 32.768MHz 的外部 **XTAL** 馈送至 PLL 模块，它乘以和除以特定因数，得出 79.87MHz 的 **MCLK** 频率 (CPU 时钟速度)。32.768kHz 的内部 **LFOSC** 用作器件辅助 **RTC** 时钟 (**RTCCLK**) 的时钟源。

3.1.1.1 BAW 振荡器

TIDA-010244 中的默认选项是体声波 (**BAW**) 振荡器：TI 的 **BAW CDC6C** 振荡器是一款高精度时钟信号发生器，频率设置为 8.192MHz。该器件采用 4 引脚封装，**CDC6C** 器件的输出时钟信号并行馈送到 **MSPM0** 的 **HFXOUT**，此外还有 **LMK1C1104** 的时钟输入。要将 **CDC6C** 用作主时钟提供者，请安装 **R8**、**R9** 和 **C11**，并移除 **R10**、**R11**、**R16**、**R19**、**C10** 和 **C12**。**BAW** 振荡器为首选设计，因为该振荡器性能出色： $F_{OUT} \geq 10\text{MHz}$ 时 **RMS** 抖动 < 1ps。

3.1.1.2 晶体振荡器

外部 16.384MHz 或 32.768MHz 晶体振荡器 (**XTAL**) 进行 2 分频或 4 分频，为 **M0_CLKOUT** 生成 8.192MHz 输出频率，作为专用的 **GPIO** 高驱动引脚。要启用此选项、请在 **XTAL** 器件旁组装 **R10**、**R11**、**C10** 和 **C12**，并删除 **R8**、**R9**、**R19** 和 **C11**。短接 **C11** 焊盘。时钟设置在软件交付内容的 **TIDA-010244.syscfg** 文件中利用 **SYSCONFIG** 工具内的图形时钟树配置实现。此外，**TIDA-010244** 上的 **XTAL** 选项还经过测量精度测试，与基于 **BAW** 的设计相当。

3.1.1.3 PWM

来自 **MSPM0G3507** 的 **PWM** 信号可提供给时钟缓冲器，以实现评估方面的目的。为了启用 **PWM** 信号，前述时钟器件之一需要连接到 **HFXIN** 和 **HFXOUT**。随后可通过 **SYSCONFIG** 工具选择和生成 **PWM** 信号。**PB10** **PWM** 引脚为缓冲器提供时钟信号。要将此信号连接到时钟缓冲器输入，需要删除 **R9** 和 **R16** 并安装 **R19**。

3.1.1.4 时钟缓冲器

由于需要将两个同步时钟分配给四个 ADC，添加了两个 LMK1C1104 时钟缓冲器。第一个缓冲器从 M0_CLKOUT 输出推算出四个 8.192MHz 的同步 CLKIN1 - 4 信号，第二个缓冲器从 SPI 外设获取 SPI 时钟，并输出四个 SCLK1 - 4 信号以单独驱动每个 ADC。

3.1.2 SPI 总线配置

所有四个 ADC 共享 SPI 总线，MCU 具有一个 SPI 控制器，该控制器具有四条单独的片选 (\overline{CS}) 线路，每条线路连接一个 ADC。SPI 总线以 19.968MHz 或 13,312MHz 数据速率运行，提供 DMA 支持，使用两个通道，一个通道用于发送，一个通道用于接收。PICO 和 POCI 数据线路是共享的，因为这些线路是按顺序驱动的，一次只有一条 \overline{CS} 线路处于活动状态。

四条 \overline{DRDY} 线路 (每个 ADC 各一条) 连接到四个 GPIO 输入，在下降沿启用中断。

需要三个 GPIO 输出：

1. 一个 SYNC_RESET 线路可同时触发所有 ADC，所有 ADC 共享 SYNC_RESET
2. 数模转换器 (ACT) 输出
3. 数模转换器 (REACT) 输出

ACT 和 REACT 脉冲输出用于报告由计量中间件计算的有功和无功电能。ACT 和 REACT 输出用于通过外部测试系统测量 TIDA-010244 精度，该测试系统会读取这些 ACT 和 REACT 脉冲。

使用 I2C 接口连接 TMAG5273 3D 霍尔传感器器件，并将 MCU 用作 I2C 发送器。RTC 模块支持日历模式，这是电表的常见要求。M0+ MCU 内部 32.768kHz LFOSC 用作器件辅助时钟 (RTCCLK) 的时钟源。

3.1.3 LED 和 UART 的跳线设置

要运行 TIDA-010244 电路板，请采用以下步骤：

1. 功率设置

默认电源通过 USB Type-C 连接。要为电路板供电，请将跳线放在 JP3 和 J18 处。以下 LED 指示正常运行：

- LED0：XDS110 仿真器使用 3.3V 电压
- LED1：MSPM0 MCU 使用 3.3V 电压
- LED3：XDS110 仿真器正常运行
- LED6：可为 MSPM0 MCU 提供 5V 电压
- LED7：可通过 USB 连接器提供 5V 电压

[电源选项和跳线设置](#)中列出了其他电源选项。

2. 通信设置

默认通过板载 USB Type-C 接口进行通信。该接口允许从 MSPM0 或板载低功耗蓝牙芯片或低功耗蓝牙耗能模块发送编程和数据。要对 MSPM0 件进行编程，请放置以下跳线：

- J6：MCU_TMS 到 MCU_SWDIO
- J7：MCU_TCK 到 MCU_SWCLK

要对低功耗蓝牙芯片或模块进行编程，请放置以下跳线：

- J6：MCU_TMS 到更改为 BLE_SWDIO
- J7：MCU_TCK 到 BLE_SWCLK

UART 通信可以提供通过电能计量库计算所得的结果。可以通过 USB Type-C 接口、FTDI 器件 (通过引脚插头) 或低功耗蓝牙芯片或低功耗蓝牙模块传输数据。

默认设置是通过 USB Type-C 接口进行数据传输。要启用此功能, 请将跳线放置在 J9, 连接到 RX 和 TX。

第二个选项是通过接头 J7 上的外部 FTDI 芯片实现。将 FTDI 电缆转换器件放置在接头处, 并确保使用 CCS 工程的 SysConfig 文件更改硬件配置。另请参阅 [UART 到 PC GUI 通信](#)。

第三个可选设置是低功耗蓝牙。测试和发送数据有多种选项。

- a. 通过 UART 从 PC 向低功耗蓝牙芯片和终端应用发送数据。
- b. 通过 UART 从 MSPM0 向低功耗蓝牙和终端应用发送数据。

对于案例 1 连接 :

- J9 RX 右侧到 JP8 (UART) HY_TX
- J9 TX 右侧到 JP8 (UART) HY_RX

对于案例 2 连接 :

- JP8 HY_RX 到 BLE_TX
- JP8 HY_TX 到 BLE_RX

3.2 软件要求

用于测试 TIDA-010244 的计量软件在最新的 [MSPM0 SDK](#) 中作为中间件示例提供。该中间件包含硬件抽象层, 这可实现独立式 ADC 与 Arm Cortex-M0+ MCU 之间的通信, 以及用于计算电能测量值的计量库。Microsoft Windows PC GUI 软件用于显示 TIDA-010244 参考设计中的计量参数, 可在 [MSPM0-SDK](#) 中找到, 请参阅目录 C:\ti\mspm0_sdk_2_03_00_07\tools\metrology_gui。

TIDA-010244 中间件代码示例的 MSPM0G3507 资源利用率为 (带有 TI Clang v3.2.2.LTS 编译器的 CCS 版本 12.8.1.00005) :

- 32,912 字节闪存用于应用代码
- 256 字节闪存用于校准数据
- 9,742 字节 RAM 存储器

3.2.1 用于 PC GUI 通信的 UART

MSPM0+ MCU 配置为通过 J9 上的 USB Type-C 接口和 UART 接口与 PC GUI 进行通信。或者、可以使用用于 UART 通信的 FTDI 接口代替 FTDI 引脚接头 J7 (这需要更改 SysCfg 文件, 因为使用了另一个 UART 端口)。

PC GUI 使用配置为 115200 波特和 8N1 的 UART 模块从 MSPM0G3507 轮询数据。用于格式化 UART 数据的 UART 协议被命名为 DLT-645, 而 UART 模块使用两个 DMA 通道: 通道 2 用于数据接收, 通道 3 用于数据发送。更多详细信息, 请参阅 [MSP430AFE253 中国国家电网规范测试报告](#) 和使用 [MSP430I2040 的单相和直流嵌入式计量 \(功率监视器 \)](#) 应用手册中的 DLT-645 协议。

UART 驱动程序支持具有最小中断负载的双向 DMA 传输（两个通道，一个用于发送，一个用于接收）。UART 数据在 `HAL_startUARTDMAReceive()` 函数中进行处理，方法是将触发值设置为 14 字节，因为这是对数据包长度进行编码的字节（可以在数据包之间动态变化）。对字节 14 进行解码后，UART DMA 传输长度值更新为新长度，包含 PC GUI 传输的 DLT-645 协议数据包的其余部分。

表 3-1 显示了 MSPM0G3507 中的多个 UART 端口。

表 3-1. UART 接口分配

选项	MSPM0G3507 UART 端口	引脚	接头
USB Type-C (默认)	UART1	RX : PA8 TX : PA9	J9
FTDI 器件	UART3	RX : PB13 TX : PB12	J7
低功耗蓝牙芯片	UART2	RX : PB18 TX : PB17	JP9

3.2.2 直接存储器存取 (DMA)

MCU DMA 模块通过共享 SPI 总线在 MSPM0G3507 MCU 与四个 AMC131M03 器件之间以最少的硬件资源和时间开销传送数据包。使用两个 DMA 通道：DMA 通道 0 用于向 ADC 发送 SPI 数据 (0x00)，DMA 通道 1 用于同时通过共享 SPI 总线接收来自所有 ADC 的测量数据。一旦从第一个 ADC 接收到完整的 SPI 数据包，就会生成 DMA 就绪中断，并且开始对数据包进行 CRC16 验证。CRC16 验证成功后，将数据包分解为各相位线的电压和电流值。然后对第二个、第三个和第四个 ADC 器件逐一进行时分多路复用访问，以读取每个相位和中性点的数据样本。对于来自 AMC131M03 的中性线数据，仅处理电流值。AMC131M03 传输 15 字节的数据包。

3.2.3 ADC 设置

为了在所有相关模拟输入通道上提供正确的测量数据，必须对 AMC131M03 器件寄存器进行初始化。每次启动计量应用以及每次运行计量校准程序时，都要完成此初始化过程。

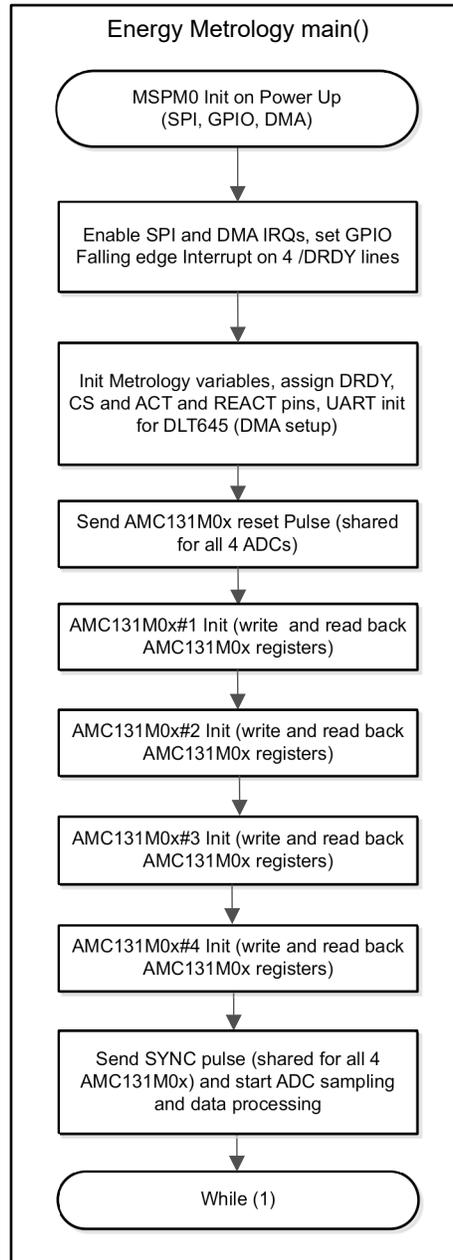


图 3-1. TIDA-010244 固件中的电能计量初始化序列

MSPM0+ MCU 的 SPI 模块配置为使用 4 线制模式的控制器器件 (SPI 硬件模块自动将 CS0、CS1、CS2 和 CS3 这四个片选信号设置为高电平和低电平有效)。设置 SPI 模块后, 所有中断都被禁用, 并且从 MSPM0+ MCU 发送 SYNC_RESET 线路上的复位脉冲。然后重新启用中断, MSPM0+ MCU 向 ADC 发送 SPI 写入命令 (首先针对 A 相向 AMC131M03 发送, 再针对 B 相向 AMC131M03 发送, 然后针对 C 相向 AMC131M03 发送, 最后针对中性向 AMC131M03 发送) , 以配置寄存器:

- MODE 寄存器设置: 使用了 16 位 CCITT CRC, AMC31M03 数据包中每个字的长度为 24 位, 在启用最滞后的通道上将 DRDY 信号置为有效, 当转换值不可用时 DRDY 置为高电平有效, 当转换值准备就绪时 DRDY 置为低电平有效。
- GAINx 寄存器设置: 对于全部三个通道, PGA 增益 = 1, 测量每个 AMC 器件上的相电压
- GAINy 寄存器设置: 对于全部四个电流测量通道 (分流通道) , PGA 增益 = 32
- CHx_CNG 寄存器设置 (其中, x 为通道编号)

- 三相模式：全部七个 ADC 通道输入连接到外部 ADC 引脚，且每个通道的通道相位延迟都设为 0（使用 SDK 中间件中的软件相位补偿，而不是 AMC131M03 硬件相位补偿）。

• CLOCK 寄存器设置：1024 OSR，所有通道均已启用，高分辨率调制器功率模式

MSPM0+ MCU 在启动时配置为当四个 *DRDY* 引脚中的任何一个发生下降沿时生成端口中断，指示新的测量样本可用。

ADC 调制器时钟来自馈入 *CLKIN* 引脚的时钟，该引脚在内部被二分频以生成 ADC 调制器时钟。因此，ADC 的采样频率如 [方程式 3](#) 所示。

$$f_S = \frac{f_M}{OSR} = \frac{f_{CLKIN}}{2 \times OSR} \quad (3)$$

其中

- f_S 是采样率
- f_M 是调制器时钟频率
- f_{CLKIN} 是馈送到 AMC131M03 *CLKIN* 引脚的时钟
- OSR 是所选的过采样率

在此设计中，MSPM0+ MCU 的 *M0_CLKOUT* 信号的频率为 8.192MHz。在适当的寄存器设置下，过采样率选择为 1024。因此，全部四个 ADC 的调制器时钟设置为 4.096MHz，采样率设置为 4000 个样本/秒。

对于测量每个相电压的三相系统，至少需要三个 AMC 器件来独立测量三个电压和三个电流，并在任意两个相位之间进行隔离。在此设计中，软件中使用了以下 ADC 通道映射进行三相配置：

- AMC131M03 (U4) 的 *AIN0P* 和 *AIN0N* → 电流 I1 (A 相电流)
- AMC131M03 (U4) 的 *AIN1P* 和 *AIN1N* → 电压 V1 (A 相相电压)
- AMC131M03 (U5) 的 *AIN0P* 和 *AIN0N* → 电流 I2 (B 相电流)
- AMC131M03 (U5) 的 *AIN1P* 和 *AIN1N* → 电压 V2 (B 相相电压)
- AMC131M03 (U6) 的 *AIN0P* 和 *AIN0N* → 电流 I3 (C 相电流)
- AMC131M03 (U6) 的 *AIN1P* 和 *AIN1N* → 电压 V3 (C 相相电压)
- AMC131M03 (U7) 的 *AIN0P* 和 *AIN0N* → 电流 N (零线电流)

3.2.4 校准

PC GUI (请参阅 [MSPM0 SDK](#) 中的 `C:\ti\mspm0_sdk_2_03_00_07\tools\metrology_gui` 目录) 用于查看结果，以及校准电能计量功能。校准期间，将在测试软件中修改校准因数类参数，以在能量测量中实现最小的误差。

对于此电表，每个相位有六个主要校准因数，分别为电压比例因数、有功功率偏移 (在 GUI 中错误地称为电压交流偏移)、电流比例因数、无功功率偏移 (在 GUI 中错误地称为电流交流偏移)、功率比例因数和相位补偿因数。电压、电流和功率比例因数将计量软件中测量的数量转换为实际值，分别以伏特、安培和瓦特为单位。功率偏移用于减去电压-电流串扰，该串扰表现为恒定功率偏移，并会在低电流下导致更大误差。最后一个校准因数是相位补偿因数，用于补偿电流传感器和其他无源器件引入的任何相移。

电压、电流和功率校准因数相互独立。因此，校准电压不会影响 RMS 电流或功率的读数。当 **Energy Metrology** 中间件首次在 MSPM0+ MCU 上刷写时，默认初始值将加载到这些校准因数。校准期间，通过 GUI 修改这些默认值。校准因数存储在 MCU 内的闪存扇区中，因此，如果重新启动硬件，校准因数将保持不变。任何比例因数的校准都称为增益校正。相位补偿因数的校准称为相位校正。在整个校准过程中，交流测试源必须打开，且电能脉冲应连接至参考表。

3.3 测试设置

[图 3-2](#) 显示了参考设计各部分在 PCB 顶层的位置；PCB 底层只有少数用于 XDS110 调试器子系统的元件。

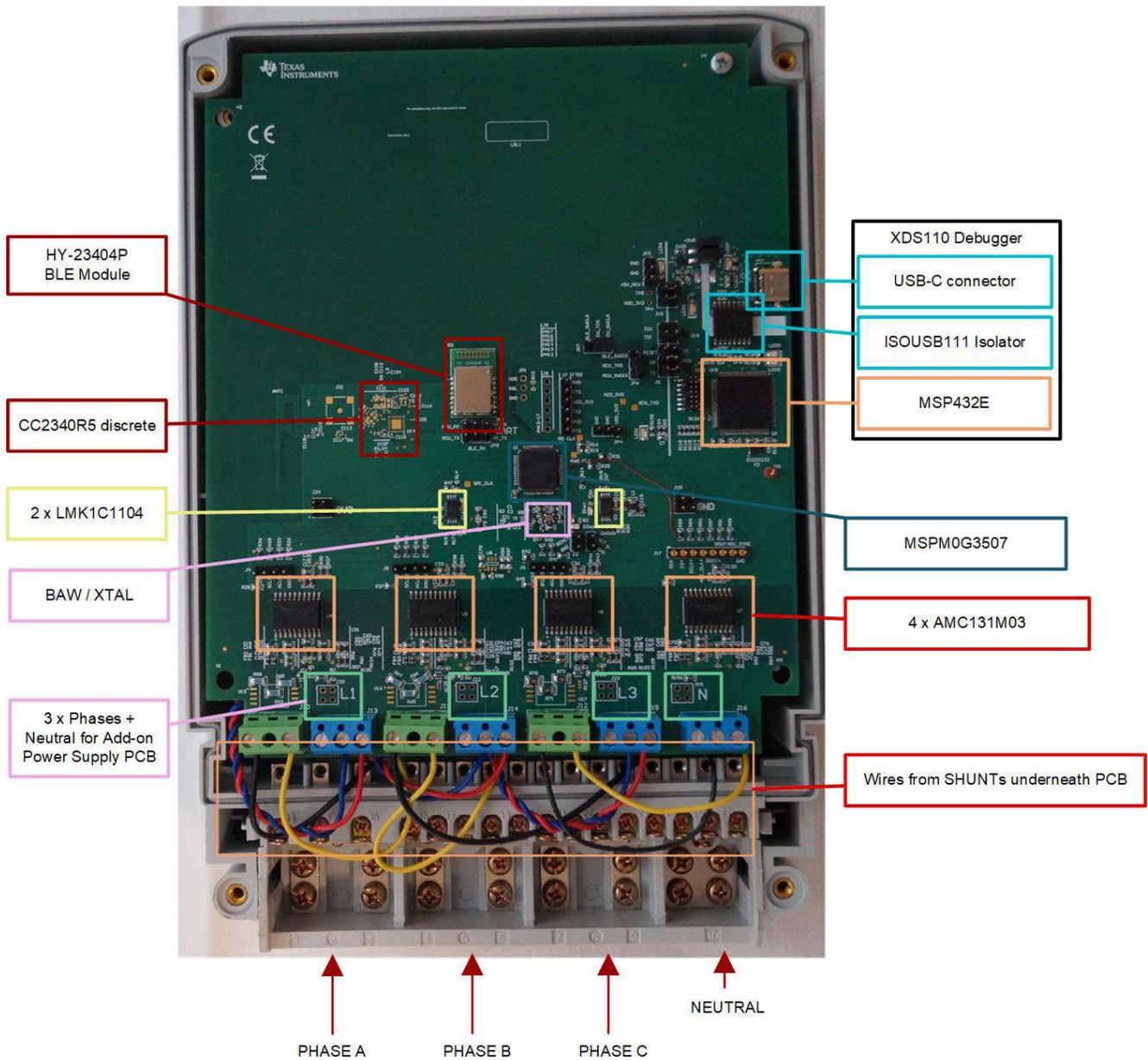


图 3-2. TIDA-010244 设计的俯视图 (突出显示元件)

3.3.1 与测试设置的连接

交流电压和电流可应用于电路板，以便在以下几点进行测试：

- J10、J11 和 J12 端子块有两个位置：第 2 个位置分别对应相位线 A、B 和 C。将第 1 个位置连接到中性线。
- J13、J14 和 J15 端子块有三个位置，其中每个端子块上第 2 个和第 3 个位置用于连接到相位线 A、B 或 C，分流器则连接到第 1 个位置。第 1 个位置是与分流器的另一个连接。不要让此端子块的端子 1 和 3 上的差分电压超过 $\pm 37.5\text{mV}$ 。HGND 端子可用于连接相位电压，并使用此电压作为电流电路的基准。
- J16 端子块是一个三位置端子块，用于获取中性点分流器上的差分电压。第 1 个位置是中性点电压，连接到 GND。将分流器引出的差分引线连接到最右侧和最左侧的位置可测量流经的电流。选择施加到分流器输入端的电流，确保其不超过允许的最大分流器电流，例如 120A。此外，在执行任何测试之前，请验证该端子块是否稳固连接到并联的输出引线。

3.3.2 电源选项和跳线设置

M0+ MCU、四个独立式 ADC 和 TIDA-010244 电路板的其余部分由外部电源供电（通过连接 3.3V 外部电源和 GND 实现）。J7 跳线是 FTDI 标准 6 引脚接头，可以连接商售现成的 FTDI UART 转 USB 电缆，以提供外部 3V3、GND 以及用于与 PC GUI 通信的 UART 端口。

各种跳线接头和跳线设置可增加电路板的灵活性。其中一些接头需要正确连接跳线，才能使电路板正常发挥作用。[LED 和 UART 的跳线设置](#) 部分介绍了电路板上各跳线的功能。

通过在 JP3 上布置跳线，可通过 USB Type-C 端口供应 5V 电源，此时 USB 接口隔离不再可用。板载 LDO 可通过 USB 供给的 5V 电源转换为 3.3V。

外部 3.3V 电源可通过电路板上的不同接头连接。可使用以下接头直接使用 3.3V 为电路板供电：

- J7、P3
- J24、P1
- JP1、P1
- JP2、P4
- JP4、P1 - 4

以下接头提供接地连接：

- J7、P1
- J25、P1 - 4
- JP1、P3
- JP4、P2 - 3
- JP5、P2 - 3

LED0 指示 USB Type-C 隔离中的 3V3 电平。LED1 指示 MSPM0 MCU 的 3V3 电压电平，LED6 指示是否向电路板施加了 5V 电平。

此外，该设计具有跳线接头（J19、J20、J22、J23）连接，可连接到高压相位，从而连接外部电源转换器（如反激式转换器）来为电路板供给 3.3V 电压。

备注

在 [表 3-2](#) 中，包含（警告）字样的接头（主要功能列中）未隔离，因此以市电运行时，请勿在这些接头处使用测量设备。如果设备通过电池供电且不连接市电，或者，如果交流市电处于隔离状态，则适用此情况（除非此设计的电路板的外部某一隔离器用来在接头位置连接）。

表 3-2. 接头名称和跳线设置

接头或接头选项名称	类型	主要功能	有效用例	注释
J10、 J11、J12	2 引脚端子块	A 相、B 相和 C 相电压 (警告)	A、B 和 C 线的电压输入	这些端子块各自通过一个端子连接到中性点电压，而第二个端子分别连接到 A 相、B 相和 C 相。
J13、 J14、J15	3 引脚端子块	连接 A、B 和 C 线的分流器 (警告)	A、B 和 C 线分流传感器后的电流输入	这是三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。在执行任何测试之前，请验证该端子块是否安全牢固地连接到 CT 的两条输出引线。
J1	2 引脚插头	有功电能脉冲 (警告)	在此处探测累积的有功电能脉冲。此接头有两个引脚：GND 和 ACT，有功电能脉冲实际在这里输出。	此接头不与交流市电隔离，因此请勿在此处连接测量设备。另请参阅 J2 的 ISO_ACT 引脚，该引脚是隔离引脚。如果需要测试有功功率脉冲，请改用 J2 的 ISO_ACT 引脚，因为该引脚是隔离引脚。
J3	2 引脚插头	无功电能脉冲 (警告)	在此处探测累积的无功电能脉冲。此接头有两个引脚：GND 和 REACT，无功电能脉冲实际在这里输出。	此接头不与交流市电隔离，因此请勿在此处连接测量设备。如果需要测试无功功率脉冲，请改用 J2 的 ISO_REACT 引脚，因为它是隔离引脚。
J102	10 引脚 2 排 连接器	中性连接 (警告)	将 XDS110 调试探针连接到此连接器，以便为 MSPM0G1106 MCU 进行编程和调试。	XDS110 调试探针用于对 MSPM0G35073 器件进行编程。要进行编程，必须从外部为 MSPM0 MCU 供电，XDS110 还会提供电源。由于此接头和 XDS110 不隔离，因此在使用市电运行且市电未隔离时，请勿连接到此接头。
J7	6 引脚插头	FTDI UART 和电源 (警告)	在未连接市电的情况下进行调试时，使用 FTDI 电缆和 UART 链路。	通过 PC USB 端口提供 UART 链路。由于此接头不隔离，因此在使用市电运行且市电未隔离时，请勿连接到此接头。
J4、J5、J6	4 引脚插头	AMC131M03 MSPM0G3507 通信接头 (警告)	在此处探测与相应 AMC131M03 器件的 4 线 SPI 信号、RST 信号、CLKIN 信号和 DRDY 信号的连接。	在所有 ADC 初始化期间，由 MSPM0G3507 驱动的 RST 引脚会复位 AMC131M03。各 AMC131M03 器件的 DRDY 引脚用于提醒 MSPM0+ MCU 有新的电流样本可用。CLKIN 引脚通过 MSPM0+ MCU 的 LMK 时钟缓冲器，从 M0_CLKOUT 时钟输出馈送到 AMC131M03 器件，后者对时钟进行分频以产生所使用的调制器时钟。 (警告) 此接头未与交流市电隔离，因此，除非可以使用参考设计的外部隔离器，否则请勿在使用市电运行时连接测量设备。此接头上的引脚映射如下： <ul style="list-style-type: none"> • 引脚 1：CS 引脚 • 引脚 2：SPI CLK • 引脚 3：AMC131M03 CLKIN 引脚 ● 引脚 4：AMC131M03 DRDY 引脚
J17	8 引脚插头	AMC131M03 MSPM0G3507 完整通信接头 (警告)	在此处探测与 AMC131M03 器件的 4 线 SPI 信号、RST 信号、CLKIN 信号和 DRDY 信号的连接。	该接头具有与 J4、J5 和 J6 相同的功能。该接头经过延长，可访问 SPI 数据线路。此接头上的引脚映射如下： <ul style="list-style-type: none"> • 引脚 1：AMC131M03 DIN • 引脚 2：AMC131M03 CS • 引脚 3：AMC131M03 SCLK • 引脚 4：CLKIN • 引脚 5：AMC131M03 DRDY 引脚 ● 引脚 6：AMC131M03 DOUT • 引脚 7：AMC131M03 SYNC、RESET 引脚 • 引脚 8： GND
J18	4 引脚端子块	MCU TDO 和 TDI		
J2	2 引脚插头	复位引脚		
J9	4 引脚端子块	UART XDS 到 MSPM0 的连接	调试 UART 信号或外部 MCU 连接。	如果在评估外部 MCU，请在此处连接一个外部 MCU，以通过 USB Type-C 端口发送数据。

表 3-2. 接头名称和跳线设置 (续)

接头或接头选项名称	类型	主要功能	有效用例	注释
J16	3 引脚端子块	中性连接 (警告)	中性线分流器后的电流输入 (如果需要监测中线电流)。	这是三位置端子块, 但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND, 不连接至分流器。在执行任何测试之前, 请验证该端子块是否稳固连接到分流器的两条输出引线。
J19、J20、J22、J23	4 引脚端子块	用于安装外部电源转换器的电源连接 (警告)	在三种测量相位为电路板供电。 警告: 已施加高电压。	
J8	6 引脚插头	未使用的 MSPM0 GPIO 引脚	此接头用于启用来自 MSPM0 的更多信号。	按需在 SysConfig 工具中启用这些 GPIO 接头引脚。
J24	4 引脚端子块	3V3 接头	使用此接头进行外部供电。	
J25	4 引脚端子块	GND 接头	使用此接头进行接地连接。	
J26	4 引脚插头	MSP432 JTAG 接口	这是用于对 MSP432 器件进行编程的备用连接。默认使用 USB Type-C。	
JP1	3 引脚跳线接头	通过 R110 = 47kΩ 上拉或下拉 MSPM0G3507 上的 BSL_Invoke 线	根据 BSL_INVOKE 是 VDD_3V3 还是 GND, 分别在 1-2 或 2-3 位置放置一条跳线。	
JP2	4 引脚端子块	5V 和 3V3 连接	5V 和 3V3 连接。放置该接头, 以将 5V 电压连接到电路板。	
JP5	3 引脚插头	外部 5V 连接		
JP6	3 引脚插头	外部编程连接	调试器的连接 (SWDIO), 用于对 MSPM0 或低功耗蓝牙芯片进行编程。	
JP7	3 引脚插头	外部编程连接器	调试器的连接 (SWCLK), 用于对 MSPM0 或低功耗蓝牙芯片进行编程。	
JP8、JP9	3 引脚插头	MCU 或低功耗蓝牙 UART RX 和 TX 连接器	通过 UART, 将数据从 MSP 发送到低功耗蓝牙芯片或模块。	

3.3.3 注意事项和警告

在高电流下，端子块可能会变热。此外请注意，相电压会馈送到电路板，因此请采取适当的预防措施。

警告



表面高温！接触会导致烫伤。请勿触摸。操作时请采取适当的预防措施。

小心



高压！将电路板连接到带电的导线时可能会发生电击。电路板应由专业人员小心处理。为安全起见，强烈建议使用具有过压或过流保护功能的隔离式测试设备。

3.4 测试结果

TIDA-010244 设计支持“多达 3 个相位 + 中性点”的配置以及分流传感器，需要连接到该配置中的四个电流输入和三个电压输入。

交流电压和电流可应用于电路板，以便在以下几点进行测试：

- 端子块 **J5**、**J6** 和 **J7** 分别对应于 **A**、**B** 和 **C** 相的线电压连接。这些是双位置端子块。
- 端子块 **J8**、**J9** 和 **J10** 分别对应于来自 **A**、**B** 和 **C** 相分流传感器的电流输入。这些是三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 **GND**，不连接至分流传感器。在测试期间，确保施加到分流器上的电流不超过 **120A**。此外，在执行任何测试之前，请验证该端子块是否稳固连接到分流器的两条输出引线。
- 端子块 **J11** 对应于来自中性线分流传感器的电流输入。这是三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 **GND**，不连接至分流器。在测试期间，确保施加到分流器上的电流不超过 **120A**。此外，在执行任何测试之前，请验证该端子块是否稳固连接到分流器的两条输出引线。

3.4.1 电表计量精度结果

为了测试电表配置中的计量精度，使用源发生器向 TIDA-010244 提供电压和电流。在此设计中，三个相位均使用了 **120V** 标称电压（在相线和中线之间）、**10A** 校准电流和 **60Hz** 标称频率，相位校准在 **60°** 进行。

在累积有功和无功电能测试中，对每个相位的电能读数之和进行精度测试。对于累积有功电能误差和累积无功电能误差测试，电流范围为 **100mA** 至 **100A**。对于累积有功电能，在馈入参考设计的电压和电流波形之间施加 **0°** (**PF = 1**)、**PF = 0.5i** (电感) 和 **PF = 0.8c** (电容) 的相移。根据有功电能输出脉冲的误差，针对三个 **PF** 值创建了一个有功电能百分比误差与电流间的关系图。

对于累积无功电能误差测试，遵循了类似的过程（但未使用 **90°** (**$\sin \phi = 1i$**)、 **$\sin \phi = 0.5i$** (电感) 和 **$\sin \phi = 0.8c$** (电容) 相移)，并且绘制了累积无功电能误差。

所有这些测试均使用 **AMC131M03** 器件的 **4ksps** 采样率设置运行。

对于 **A** 相的 **V_{RMS}** 精度测试，电压在 **10V** 至 **270V** 范围内变化，而电流稳定在 **10A**。对于 **A** 相上的 **I_{RMS}** 精度测试，电压稳定在 **120V**，而电流在 **0.025A** 至 **100A** 范围内变化。

以下两张有功功率和无功功率图符合 **IEC 62053-22** 的 **0.2S** 和 **0.5S** 级精度限值，假设 **I_{nominal} = 15A**；因此 **I_{nominal}** 的 **5%** 点位于 **750mA** 处。

通过五个测试系列计算每次测量的平均误差，按顺序针对每个电流值进行测量，然后计算这五个测量值的最大偏差（在下面的图中未显示），以确认该计量子系统的稳定性低于允许最大误差的 **10%**。

对于以下测试结果，对电表应用了增益、相位和偏移校准。在更高的电流下，所示的百分比误差主要由分流电阻漂移决定，这种漂移是由于高电流产生的热量增加引起的。

使用以下各项的校准值数据记录测试数据：

- $V_{in} = 120V$
- $I_{in} = 10A$
- 在 60° 校准相位
- 相位 = 3
- ACT 和 REACT 的电能脉冲 = 6400
- 室温

表 3-3. 有功电能百分比误差与电流间的关系， $200\mu\Omega$ 分流电阻

电流 (A)	平均误差 % PF = 1 , $\cos \phi = 0^\circ$	限值 (%) [0.2 级] IEC 62053-22 (PF 0.5i/0.8c)	限值 (%) [0.5 级] IEC 62053-22 (PF 0.5i/0.8c)	平均误差 % PF = 0.5i , $\cos \phi = 60^\circ$	限值 (%) [0.2 级] IEC 62053-22 (PF 0.5i/0.8c)	限值 (%) [0.5 级] IEC 62053-22 (PF 0.5i/0.8c)	平均误差 % PF = 0.8c , $\cos \phi = -36.87^\circ$
0.1	0.05	0.4	1	-0.0062	0.5	1	0.0844
0.5	0.022	0.4	1	0.0088	0.5	1	0.052
0.75	0.019	0.4	1	-0.0044	0.5	1	0.0484
1.5	0.014	0.2	0.5	-0.0126	0.3	0.6	0.044
3	0.016	0.2	0.5	-0.016	0.3	0.6	0.0522
7.5	0.008	0.2	0.5	-0.0488	0.3	0.6	0.0546
15	-0.006	0.2	0.5	-0.0556	0.3	0.6	0.0368
30	-0.013	0.2	0.5	0.0116	0.3	0.6	0.0154
60	-0.037	0.2	0.5	-0.0398	0.3	0.6	-0.018
75	-0.082	0.2	0.5	-0.1036	0.3	0.6	-0.058
100	-0.096	0.2	0.5	-0.2234	0.3	0.6	-0.118

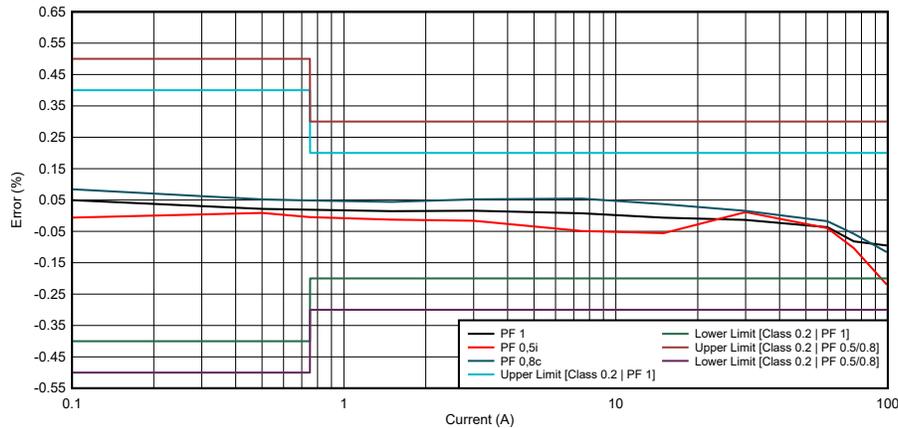


图 3-3. 有功电能 % 误差

表 3-4. 无功电能 % 误差与电流间的关系，200μΩ 分流阻值

电流	平均误差 % sin φ = 1i (90°)	限值 (%) [1 级]	限值 (%) [0.5 级]	平均误差 % sin φ = 0.5i (30°)	限值 (%) [1 级]	限值 (%) [0.5 级]	平均误差 % sin φ = 0.8c (-53.13°)
0.1	-4.6028			-9.0318			6.3002
0.5	-0.8614	3	2	-1.6634			1.3914
0.75	-0.5374	3	2	-1.0236			0.9742
1.5	-0.2142	2	1	-0.4482	3	2	0.543
3	-0.0452	2	1	-0.1348	2	1	0.334
7.5	0.0504	2	1	0.0656	2	1	0.194
15	0.0796	2	1	0.112	2	1	0.1502
30	0.1006	2	1	0.1416	2	1	0.1354
60	0.0904	2	1	0.1272	2	1	0.1026
75	0.0608	2	1	0.1004	2	1	0.0746
100	-0.0642	2	1	0.0532	2	1	-0.0596

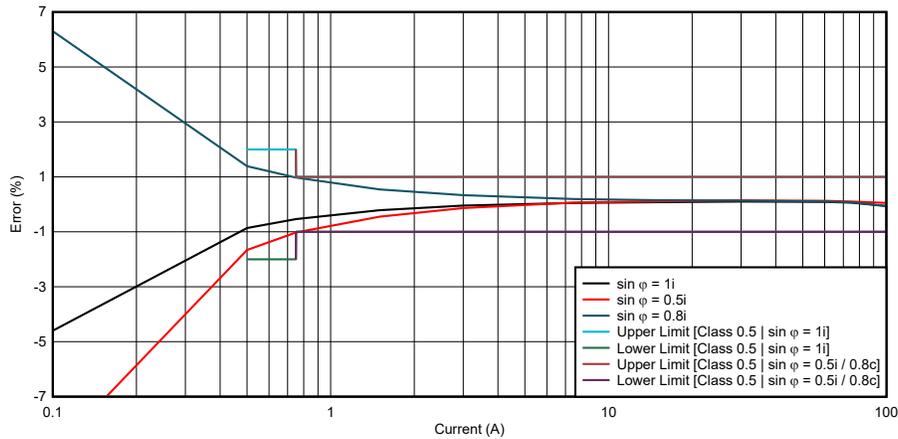


图 3-4. 无功 % 电能误差 (三相)

表 3-5. 120V 时的电流 RMS % 误差，200 $\mu\Omega$ 分流阻值

电流 (A)	A 相	B 相	C 相
	% 差分	% 差分	% 差分
0,025	-3,583	-2.67	-6,677
0.05	-1,306	-1,051	-2,144
0.1	-0,382	-0.35	-0,268
0.25	-0,076	-0,097	-0,095
0.5	-0,021	-0.06	-0,013
1	-0,025	-0,109	-0,014
2	-0.01	-0,066	0.0025
5	-0.04	-0,093	0.0098
10	-0,051	-0,095	-0,021
20	-0,038	-0,075	0,011
30	-0,038	-0,072	0.01
40	-0.01	-0,055	-0,002
50	0.0114	-0.07	0.0006
60	-0,021	-0,071	0.0157
70	-0,015	-0,032	0.0353
80	0.0007	0,008	0.0733
90	0.03	0,063	0.0974
100	0.0462	0.05	0.0648

以下是全部三相的电流误差图：

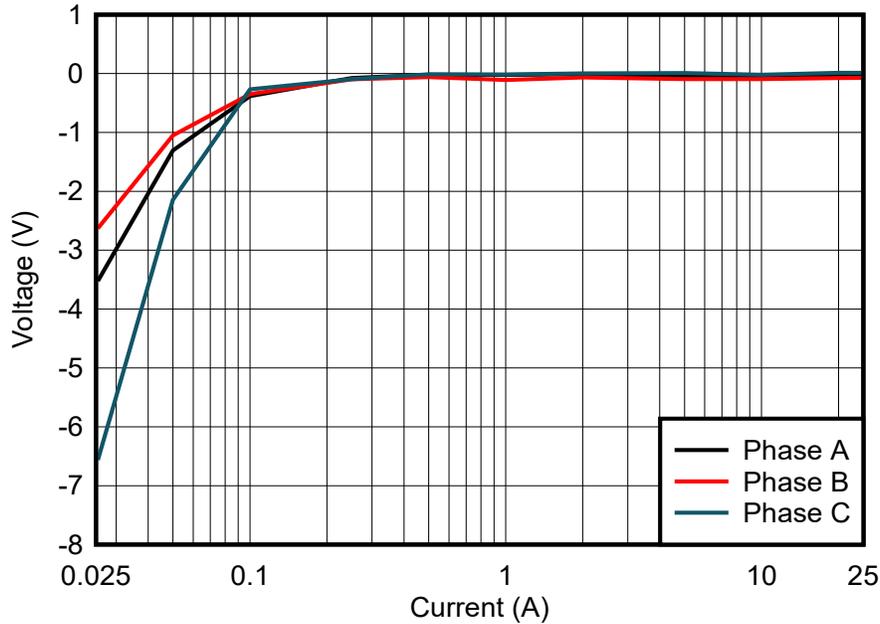


图 3-5. 120V、200 $\mu\Omega$ 分流时，A、B 和 C 相的电流 RMS % 误差

表 3-6. 10A 时的电压 RMS % 误差，200 $\mu\Omega$ 分流阻值

电压 (V)	A 相	B 相	C 相
	% 差分	% 差分	% 差分
9	0,088	0.0856	0.0633
10	0,097	0.05	0.06
30	0,093	0.0463	0,043
50	0,031	0.0238	0.0178
70	0.03	0.0027	0.0084
90	0,022	0.0059	-0,006
100	0,073	-0,013	-0,016
120	-0,013	-0,014	-0,026
140	-0,047	-0.05	-0,021
160	-0,054	-0,066	-0.05
180	-0,046	-0,069	-0,071
200	-0.07	-0,089	-0,063
220	-0,098	-0,107	-0,089
230	-0,097	-0,112	-0,096
240	-0,084	-0,108	-0.1
260	-0,137	-0,126	-0,118
270	-0.13	-0,138	-0,138

以下是全部三相的组合图：

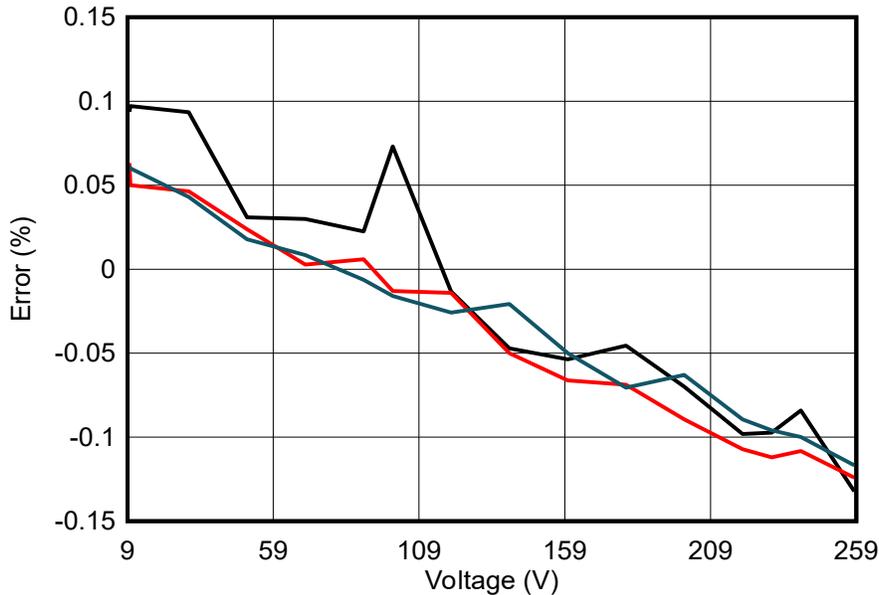


图 3-6. 电 10A、200 $\mu\Omega$ 分流时，A、B 和 C 相的电压 RMS % 误差

3.4.2 辐射发射性能

图 3-7 和 图 3-8 中的图表是根据 EN50022 标准，在使用 JB3 天线的 3m CISPR 室内采集的。这两张图表显示了当天线处于水平或垂直位置时，TIDA-010244 辐射发射 (RE) 的准峰值采集数据，并分别标有 频谱概览 H 和 频谱概览 V。在每次采集时，电路板均垂直向上放置（器件顶部面向天线）、连接到线路，但无负载。天线位于 0m 和 1m 处，分别代表天线与电路板位于同一高度，以及位于电路板上方 1m 高处。每个图表中还采集了多种电路板旋转角度（0、90、180、270）。图表中仅显示了在不同天线高度和电路板方位条件下，最高的发射峰值。

TIDA-010244 的辐射发射有两个主要来源：数字 SPI 信号和每个 AMC 器件的内部 DC-DC 变压器。数字 CLKIN 信号以 8.192MHz 运行，谐波在整个发射频谱内可见。SPI 通信也会发射辐射，由于周期不规则，导致频率范围下半部分出现更宽、更小的峰值。另一组发射峰值来自 AMC 器件的内部 DC-DC 变压器，它们在大约 32MHz 的范围内工作。与电网之间的连接放大了这些发射，从而形成一根导致 DC-DC 基频信号辐射出去的天线。AMC 器件输入与线路连接之间添加了铁氧体，以阻止 DC-DC 基频信号传播到线路，并减少辐射发射。在 RE 测试期间，TIDA-010244 由电池供电。

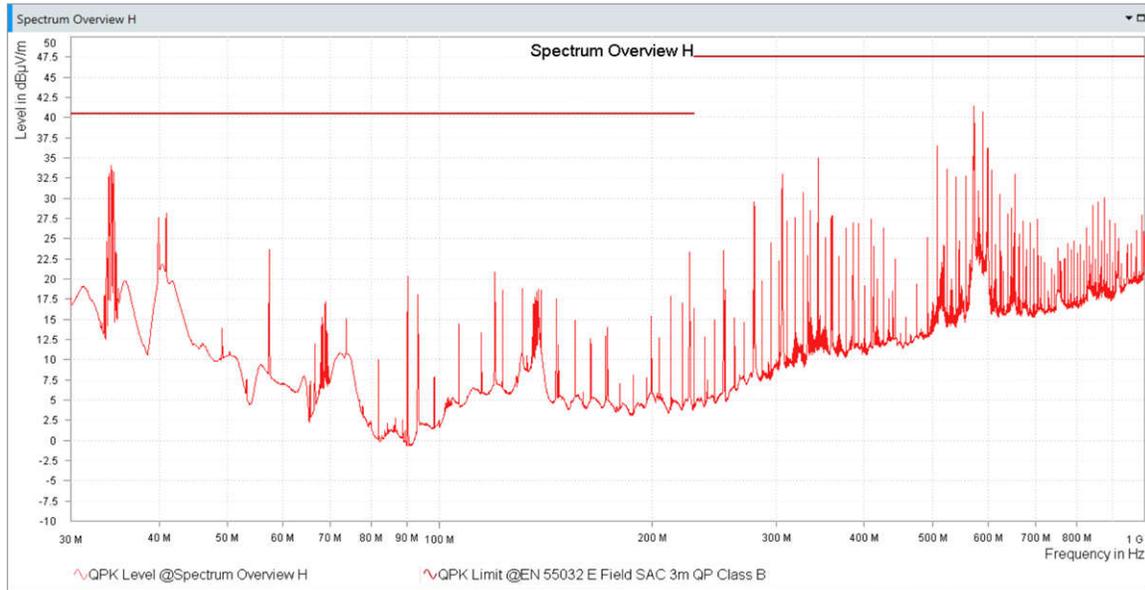


图 3-7. 频谱概览 H

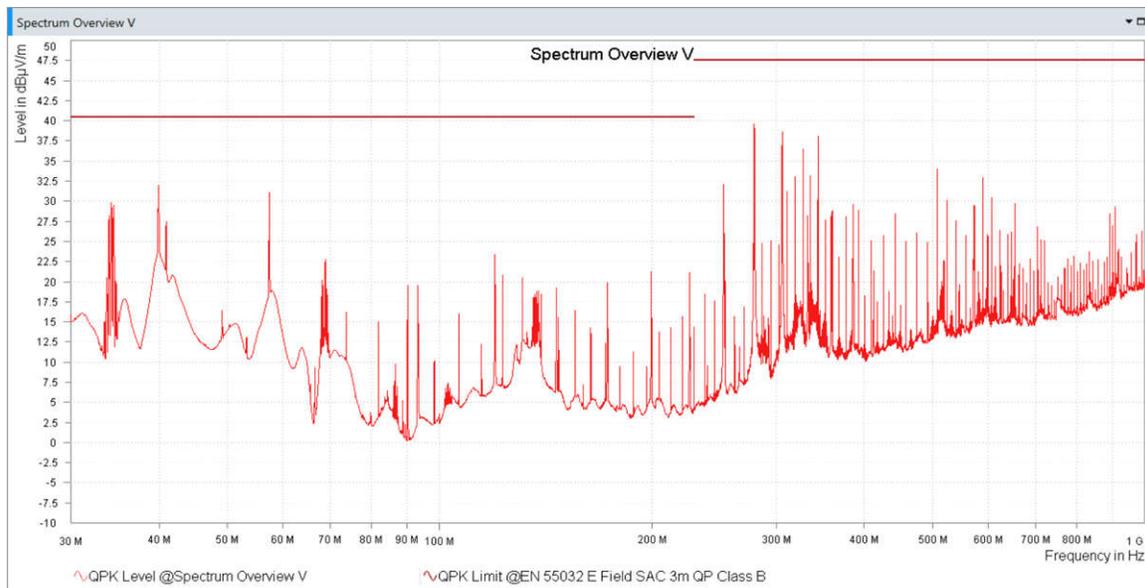


图 3-8. 频谱概览 V

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010244](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010244](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

对于此设计，请遵循以下通用指南：

- 将去耦电容放置在靠近相关引脚的位置。
- 使用接地平面而不是接地布线，尽量减少接地平面中的切口，尤其是 AMC131M03 附近的切口。在该设计中，顶层和底层都有一个地平面；这种情况下，请通过充分使用过孔来确保平面之间良好拼接。
- 保持通往 ADC 通道输入端的两条不同布线对称，并且彼此尽可能靠近。
- 对于 AMC131M03 器件，应将 0.1 μ F 电容器（而不是 1 μ F 电容器）放置在更靠近 AVDD 引脚的位置。对于连接到 DVDD 的 0.1 μ F 电容器和 1 μ F 电容器，同样如此。
- 尽量缩短用于将晶体连接到微控制器的布线的长度。围绕晶体引线放置保护环，并将晶体外壳接地。此外，晶体振荡器 (XTAL) 或 BAW 器件下方必须有干净的接地，因此必须避免进行任何布线。此外，要使高频信号远离 MSPM0G3507 的时钟岛。
- 在电源连接中使用宽布线。
- 确保本设计中的 AMC131M03 和 ISOUSB111 隔离器件满足建议的间隙和爬电间距。

4.1.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010244](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

CCSTUDIO	Code Composer Studio™ 集成式开发环境 (IDE)
MSPM0-SDK	MSPM0 软件开发套件 (SDK)
SYSCONFIG	包含直观图形用户界面的系统配置工具，用于配置引脚、外设、无线电、软件栈、RTOS、时钟树和其他元件。

[适用于能源库的中间件](#) 像中间件软件包这样的 SDK 计量库示例使用高性能多通道模数转换器 (ADC)，实施了各种电能参数，这些参数是电表的典型参数。

软件

[TIDA-010244](#) MSPM0 SDK 中 TIDA-010244 能源库的源代码及默认安装路径：

[固件](#) C:\ti\mspm0_sdk_2_03_00_07\examples\nortos\LP_MSPM0G3507\energy_metrology\TIDA_010244\TIDA_010244_SW

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [AMC131M03 具有集成直流/直流转换器的 3 通道、64kSPS、同步采样、24 位隔离式 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC 数据表](#)。
2. 德州仪器 (TI), [MSPM0G350x 具有 CAN-FD 接口的混合信号微控制器 数据表](#)
3. 德州仪器 (TI), [CC2340R SimpleLink™ 2.4GHz 无线 MCU 系列数据表](#)
4. 德州仪器 (TI), [ISOUSB111 全速/低速隔离式 USB 中继器数据表](#)
5. 德州仪器 (TI) [TMAG5273 具有 I2C 接口的低功耗线性 3D 霍尔效应传感器数据表](#)
6. 德州仪器 (TI), [TPS7A37 具有反向电流保护功能的 1% 高精度 1A 低压降稳压器数据表](#)
7. 德州仪器 (TI) [RES60A-Q1 汽车级 1400V_{DC} 精密电阻分压器数据表](#)
8. [实施电表磁篡改检测](#)
9. [PTS 3.3 genX - EMH 便携式三相测试系统](#)

4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

4.5 商标

E2E™, Code Composer Studio™, and TI E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm®, Cortex®, and Thumb® are registered trademarks of Arm Limited.

USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

蓝牙® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

iPhone® is a registered trademark of Apple Inc.

Android® is a registered trademark of Google LLC.

PCI-Express® is a registered trademark of PCI-SIG.

V-by-One® is a registered trademark of Thine Electronics Kabushiki Kaisha.

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

ZigBee® is a registered trademark of ZigBee Alliance.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

MILEN STEFANOV (M.Sc.E.E) 是 TI 的系统工程师，负责电网基础设施领域，此外他还是射频通信技术和 (智能) 计量应用方面的专家。毕业后，他在开姆尼茨工业大学 (TUC) 担任了 5 年的研究助理，之后的三年半，他在半导体行业担任高速光和有线通信系统工程师。他于 2003 年加入 TI，成为一名 Wi-Fi® 专家，并在主要的 OEM 提供 TI Wi-Fi 产品支持。自 2010 年以来，他一直致力于开发面向欧洲电网基础设施市场的计量和 Sub-1GHz 射频设计。Stefanov 先生在欧洲发表了多篇关于 wM-Bus 技术的文章，并在于慕尼黑举行的无线大会与智能家居和计量峰会上提交了技术论文。

GAVIN LOERA (B.S BME) 是 TI 的系统工程师，负责电网基础设施领域，专注于电流检测技术和计量应用。毕业后，他曾任 Abbott Laboratories 的测试技术员，然后于 2022 年通过应用轮岗计划加入 TI。他加入了电网基础设施 SEM 团队，主要负责计量和电流检测。Gavin 在精密模数转换器 (PADC) 应用团队工作了 6 个月，在那里他了解了有关精确 ADC (电表的关键模拟组件) 的更多信息。

FELIX DEBUS (M. Sc. E. E.) 是 TI 的一名现场应用工程师，在负责欧洲合同制造商的销售团队中工作。在学生时代，他曾在 TI 从事过 3 年汽车主题的工作，到 2024 年毕业之后参与了现场应用工程师轮岗计划。在此计划期间，他在能源基础设施团队中轮岗，从事电表方面的工作。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司